



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# METODA URČOVÁNÍ PŘESNOSTI OBRÁBĚCÍCH ROBOTŮ

METHOD FOR EVALUATION ACCURACY OF MILLING ROBOTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Jan Cabalka

VEDOUcí PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/14

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Jan Cabalka

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Metoda určování přesnosti obráběcích robotů**

v anglickém jazyce:

### **Method for evaluation accuracy of milling robots**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat problematikou měření přesnosti obráběcích robotů v průmyslové praxi. Při měření nelze využít tradičních metod, které jsou odvozeny od lineárních pohybů konvenčních strojů. Je to dáno jak skladbou pohybů z šesti rotačních os i odlišným řídicím systémem robotů. Úkolem práce je navrhnout univerzální metodu určování přesnosti pro průmyslové roboty určené pro frézování za pomoci efektivních a dostupných nástrojů.

Cíle diplomové práce:

- rozbor technologie obrábění pomocí robotů
- rozbor metod využívaných k měření přesnosti strojů
- návrh metody měření přesnosti
- praktické ověření navrženého řešení
- ekonomické zhodnocení vybraného řešení

Seznam odborné literatury:

EHRENBERGER, Zdeněk a Zdeněk KOLÍBAL. Průmyslové roboty. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1993, 145 s. ISBN 8021405300.

KATIC, Dusko a Miomir VUKOBRATOVIC. Intelligent control of robotic systems.

Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003, 294 s. ISBN 1-4020-1630-1.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno:

Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

TLUSTÝ, Jiří. Manufacturing processes and equipment. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999, xxviii, 928 s. ISBN 0-201-49865-0.

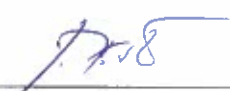
MAREK, Jiří et al. Konstrukce CNC obráběcích strojů. Vyd. 2, přeprac., rozš. Praha: MM publishing, 2010, 420 s. ISBN 978-80-254-7980-3.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 21.11.2013



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem metodiky měření přesnosti robotického obrábění. Popisuje teoretické vlastnosti a rozdělení běžně dostupných metod měření přesnosti strojů. V praktické části je vyroben zkušební obrobek a systémem Pontos jsou změřeny parametry polohy a dráhy. Návrhy zohledňují vybavení firmy MCAE Systems.

### Klíčová slova

Obráběcí robot, měření přesnosti, zkušební obrobek, Pontos, Atos, Tritop, Tebis, CAMrob, Kuka.

## ABSTRACT

This thesis describes the design of methodology for measuring the accuracy of robot machining. It describes the theoretical properties and classification of commercially available methods for precision measurement. In the practical part, a test workpiece is manufactured and positions and toolpaths are measured by the Pontos system. The proposals are based on the MCAE Systems company's equipment.

### Key words

Robot machining, precision measurement, test workpiece, Pontos, Atos, Tritop, Tebis, CAMrob, Kuka.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CABALKA, J. *Metoda určování přesnosti obráběcích robotů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 88 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

### PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Metoda určování přesnosti obráběcích robotů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Bc. Jan Cabalka

**PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval Ing. Janu Zouharovi, Ph.D. za vedení diplomové práce. Dále musím poděkovat zaměstnancům firmy MCAE Systems, kteří mi byli oporou v praktické části diplomové práce.

## OBSAH

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH .....	7
ÚVOD .....	10
1 ROZBOR TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ POMOCÍ ROBOTŮ.....	11
1.1 Definice průmyslového robota.....	12
1.2 Dělení robotů .....	13
1.3 Programování průmyslových robotů .....	14
1.4 Obráběcí robotické pracoviště .....	15
1.5 Posouzení obráběcího stroje .....	16
1.6 Výkonnost obrábění .....	16
1.7 Pracovní přesnost obráběcích robotů.....	17
2 ROZBOR METOD VYUŽÍVANÝCH K MĚŘENÍ PŘESNOSTI STROJŮ .....	18
2.1 Schlesingerova metoda .....	19
2.2 Laserinterferometr .....	21
2.3 Laser Tracker .....	23
2.4 Laser Tracer .....	25
2.5 Samocentrovatelná hlava s využitím artefaktu .....	26
2.6 Měřicí sada Renishaw Axi-set .....	28
2.7 Měřicí systém Renishaw ballbar .....	28
2.8 Přesnost strojů výrobou zkušebního obrobku .....	29
3 NÁVRH METODY MĚŘENÍ PŘESNOSTI VÝROBOU ZKUŠEBNÍHO OBROBKU .....	31
3.1 Účel metody .....	31
3.2 Upřesnění metody .....	31
3.3 Výběr obráběného materiálu a umístění polotovaru .....	31
3.4 Rozměry a tvar zkušebního obrobku .....	32
3.5 Obráběcí nástroj .....	34
3.6 Volba řezných podmínek .....	34
3.7 Technologický postup obrábění .....	35
3.8 Upnutí zkušebního obrobku .....	35
3.9 Určení souřadného systému .....	36
3.10 Upřesnění metody .....	36
3.11 Měření zkušebního obrobku .....	36

3.12 Vyhodnocení naměřených veličin .....	36
<b>4 NÁVRH METODY MĚŘENÍ PŘESNOSTI SYSTÉMEM PONTOS .....</b>	<b>37</b>
4.1 Stručný popis a využití systému Pontos .....	37
4.2 Parametry a základní vlastnosti systému Pontos .....	38
4.3 Měřicí body .....	39
4.4 Příprava systému na měření .....	39
4.5 Zkušební podmínky .....	40
4.6 Návrh koncového efektoru pro kalibrované body .....	40
4.6.1 Mechanicky deformovatelný upínač .....	41
4.6.2 Mechanický upínač s nosnou plochou .....	42
4.6.3 Mechanický upínač a nosný prvek se sražením .....	43
4.7 Měření koncového adaptéru .....	44
4.8 Určení měřeného prostoru .....	46
4.9 Zkušební rychlost .....	46
4.10 Definice parametru polohy .....	47
4.11 Definice parametru dráhy .....	48
4.11.1 Přímka .....	48
4.11.2 Kružnice 1 .....	48
4.11.3 Kružnice 2 .....	48
4.11.4 Obdélník .....	48
<b>5 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ METODY MĚŘENÍ PŘESNOSTI VÝROBOU</b>	
<b>ZKUŠEBNÍHO OBROBKU .....</b>	<b>49</b>
5.1 Popis měřeného robota .....	49
5.2 Obráběcí pracoviště .....	50
5.2.1 Obráběný materiál .....	51
5.3 Měření nástrojů pro obrábění .....	52
5.3.1 Najížděcí hrot .....	52
5.3.2 Stopková fréza D18 .....	52
5.3.3 Stopková fréza D10 .....	52
5.3.4 Toroidní fréza D52 .....	52
5.4 Tvorba NC programu Tebis .....	52
5.4.1 Hrubování D18 .....	53
5.4.2 Dokončování D18 .....	54
5.4.3 Hrubování D10 .....	55
5.4.4 Dokončování D10 .....	56
5.4.5 Dokončování D52 .....	57



5.5 Příprava zkoušky.....	58
5.6 Výroba zkušebního obrobku.....	59
5.7 Měření zkušebního obrobku .....	60
5.7.1 Příprava měřeného objektu .....	60
5.7.2 Kontrola a ustavení zařízení .....	60
5.7.3 Kalibrace zařízení .....	60
5.7.4 Skenování obrobku .....	60
5.8 Vyhodnocení naměřených hodnot .....	61
6 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ METODY MĚŘENÍ PŘESNOSTI SYSTÉMEM PONTOS ..	64
6.1 Příprava měření.....	64
6.2 Výroba adaptéru s nosným prvkem .....	65
6.3 Výroba adaptéru s nosným prvkem se sražením .....	66
6.4 Měření koncového adaptéru.....	67
6.5 Určení počátku souřadného systému .....	68
6.6 Tvorba NC programu.....	68
6.7 Praktické měření .....	70
6.8 Výsledky a statické vyhodnocení .....	71
7 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VYBRANÉHO ŘEŠENÍ .....	75
7.1 Spotřeba času .....	75
7.1.1 Zkušební obrobek .....	75
7.1.2 Měření systémem Pontos .....	76
7.2 Náklady navržených metod .....	76
7.2.1 Zkušební obrobek .....	77
7.2.2 Měření systémem Pontos .....	78
7.3 Ekonomické porovnání metod .....	79
DISKUSE.....	80
ZÁVĚR .....	81
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	82
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	86
SEZNAM PŘÍLOH.....	88

## ÚVOD

Přesnost obráběcích strojů představuje jeden článek řetězce technologie výroby. Pravidelná diagnostika limituje a snižuje nepřesnost konečných výrobků, která je v dnešní době řešena nejedním majitelem výrobního zařízení. Uživatel stroje je cíleně motivován k pravidelným servisním intervalům a náležité péči o své výrobní prostředky. Mezi servisní úkony je mnohem častěji využíváno měření přesnosti. Starší obráběcí stroje s vysokým náběhem provozních hodin a stroje po nehodě, nemusí vyhovovat tolerancím zavedené výroby. Kalibrace může zlepšit výslednou přesnost a současně s provedenou diagnostikou zjistíme fakta pro konkrétní stroje.

Meziroční prodeje robotů mají v posledních letech rostoucí trend, který je v nepříznivých ekonomických podmínkách pouze utlumen. Slabý ekonomický růst a tlak na snižování nákladů jsou důvodem následného rostoucího zájmu o tato zařízení během příznivého období pro investice. Obráběcí robot je zdárným příkladem, jak uspořit finance a přitom inovativním způsobem modernizovat výrobu o speciální zařízení.

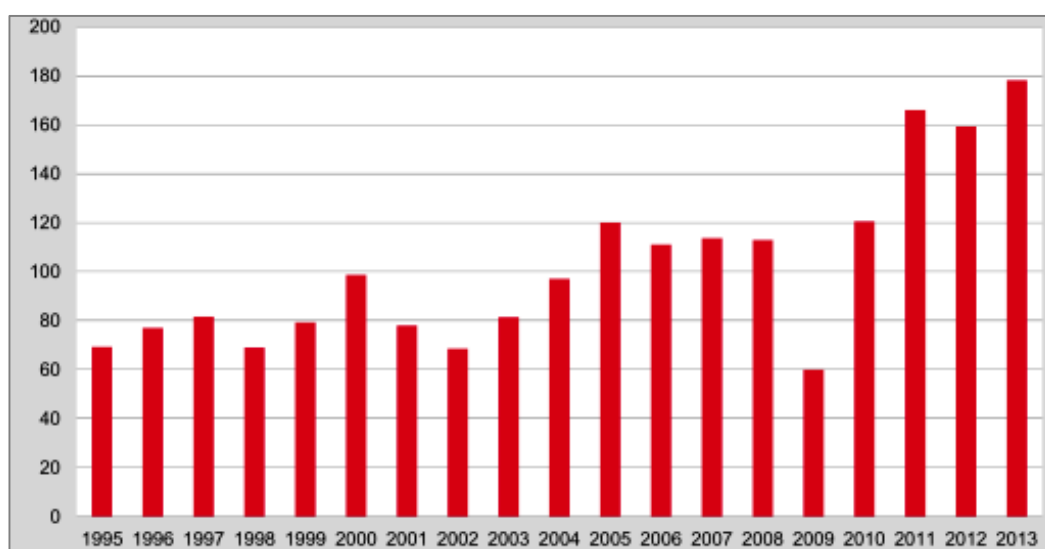
Výrobci na rostoucí odbyt reagují rozšířením nabídek strojů pro uplatnění ve všech technicky proveditelných oblastech. Financují v nemalých částkách marketingová oddělení, která často docílí větších úspěchů než samotný vývoj nové a modernější technologie. Běžný život nám velmi často poskytne příležitost spatřit přeměnu průměrného výrobku ve špičkový, který dle slov obchodníka musí každý mít. Zklamání po zakoupení takto špičkového produktu přichází v pozdější době, kdy je potřeba řešit vhodné uplatnění nově nakoupeného zařízení. Následně přichází podání reklamace a zásah technika, který ladí nakoupený stroj co nejbližší k deklarovaným přesnostem.

Specializovaný servis volí různorodé zkoušky měření přesnosti a výrobci měřících zařízení mají za cíl technikům práci usnadnit. Kalibrovaný úchylkoměr, pravítko a libela patří do měřicí výbavy už od roku 1932, kdy pan Dr.G.Schlesinger představil metody měření přesnosti obráběcích strojů. Předložená metodika je pilířem využívaných postupů v dnešní době a moderní přístroje pouze rozšiřují uplatnění s lepším zacílením na problematiku místa.

Úvodem je v diplomové práci popsán základní rozbor technologie obrábění pomocí robotů. Dále jsou představeny běžně používané měřicí metody obráběcích strojů a v návaznosti na problematiku jsou navrženy zkoušky přesnosti obráběcího robota s využitím dostupného zařízení. Praktická část ověřuje použitelnost metod a vyhodnocení naměřených dat.

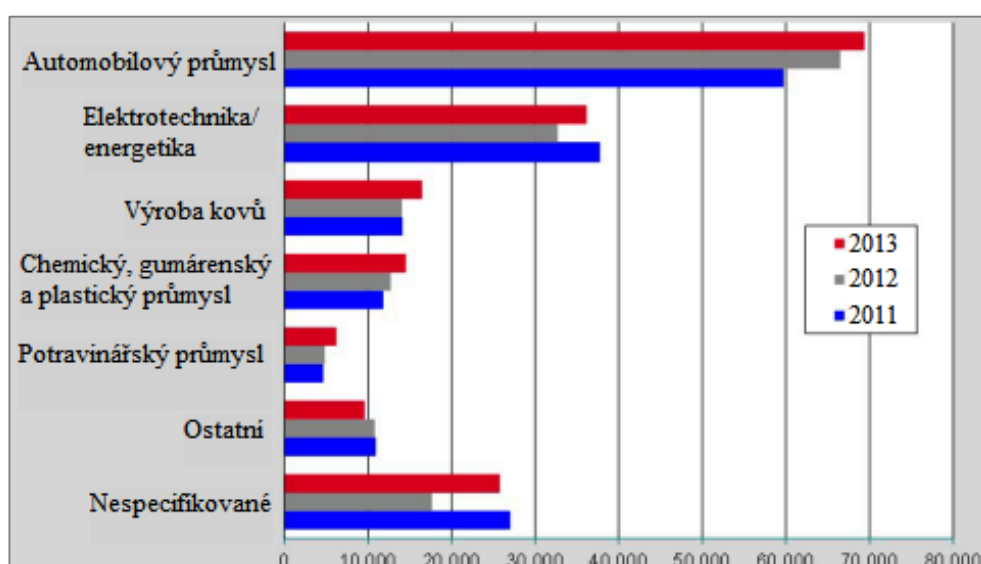
## 1 ROZBOR TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ POMOCÍ ROBOTŮ

Novodobé pojetí průmyslové výroby požaduje zapojení moderních technologií s cílem snížení výrobního času. Konkurence a vysoká pořizovací cena limituje využití moderních prvků technologie pro malosériovou výrobu, která je pro různorodost koncových produktů výchozí. Uplatnění robotiky přesto roste, příkladem je na grafu uvedena celosvětová produkce robotů (viz. obr.1.1).



Obr. 1.1 Odhadovaná celosvětová výroba průmyslových robotů v tisících<sup>1</sup>.

Drahá pracovní síla motivuje firmy zavádět úsporná opatření a ve výrobě nahrazuje robot manuální pracovníky. Významným odběratelem je automobilový průmysl, který určuje směr vývoje automatizace v globalizovaném světě.



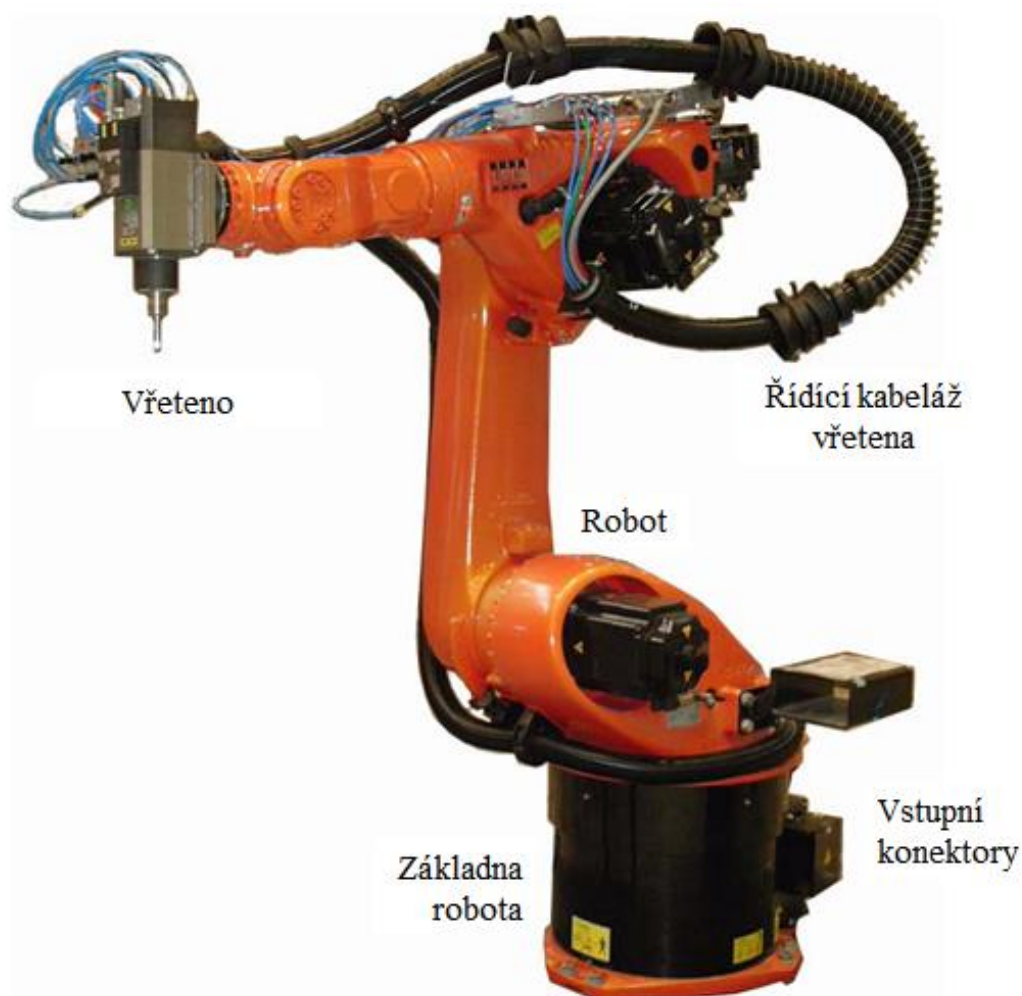
Obr. 1.2 Produkce průmyslových robotů podle odvětví<sup>1</sup>.

Poslední roky je patrný potenciál růstu, zejména v Latinské Americe a Asii, tedy v zemích, kde industrializace přichází do stupně automatizace. Je očekáván také růst na hlavních trzích německy mluvících zemích, nebo na trzích Severní Ameriky.

### 1.1 Definice průmyslového robota

Slovo robot je z širokého pohledu nejednoznačný název. Světová literatura využívá tento pojem pro označování automatického manipulačního zařízení s odlišným cílovým zaměřením. Zjednodušeně lze definovat dle Ing. Ivana M.Havla, CSc., který již v osmdesátých letech vymezil tento název<sup>4</sup>.

Robot je automatický nebo počítačem řízený integrovaný systém, schopný autonomní, cílově orientované interakce s přirozeným prostředím, podle instrukcí od člověka. Tato interakce spočívá ve vnímání a rozpoznávání prostředí a manipulování s předměty, popř. v pohybování se v tomto prostředí<sup>4</sup>.



Obr. 1.3 Průmyslový robot firmy Kuka osazený obráběcím vřetenem<sup>2</sup>.

Myšlenka náhrady člověka ve výrobě je při zavádění této technologie prioritou. V praxi se nejčastěji využívá automatizovaný manipulátor. Významový rozdíl vůči průmyslovému robotu je patrný až při bližším porovnání inteligence řídicího systému.

Definice od různých autorů není jednoznačná, ale vyplývá, že průmyslové roboty lze uvádět jako specifickou podmnožinu robotů pro konkrétní zaměření. Je to myšlenka různorodosti kinematiky jako například chodící robot (humanoidní), který napodobuje chůzi savce, nebo speciální kolové mechanismy. Samotné manipulační rameno zastupuje ucelený mechanismus, pro širší uplatnění doplňován o koncové ústrojí (viz. obr 1.3).

## 1.2 Dělení robotů

Robotika jako ucelený obor je dělena dle mnoha kritérií. Uživatelské rozdělení posuzuje roboty pro jejich využití na průmyslové a experimentální.

Základní rozdělení robotů podle zaměření<sup>3</sup>:

- průmyslové roboty (viz. obr 1.4a),
- specializované, domácí a servisní roboty (viz. obr 1.4b),
- humanoidní roboty (viz. obr 1.4c).

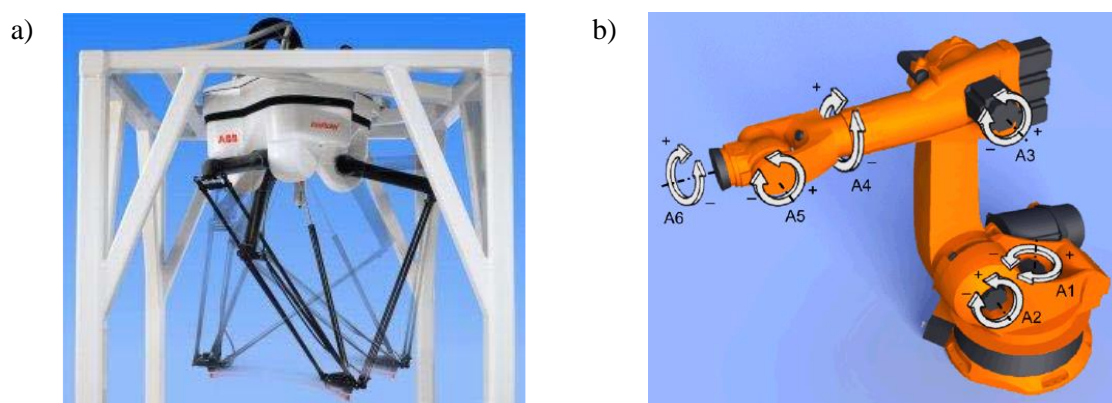


Obr. 1.4 Základní dělení robotů<sup>3</sup>, a) průmyslový robot, b) robotická sekačka, c) chodící robot.

Průmyslové roboty dělení dle kinematiky:

- sériová kinematika,
- paralelní kinematika.

Stroje s paralelní kinematickou strukturou (viz. obr 1.4a), využívajících kombinaci rotačních a translačních pohybů, zapojením do prutové soustavy lineárních jednotek navzájem spojených v jediném bodě. Kloubový systém prezentuje rovnostranný trojúhelník se středovým referenčním bodem.



Obr. 1.5 Dělení dle kinematiky<sup>3</sup>, a) ABB Delta robot<sup>3</sup>, b) Osově specifický pohyb<sup>2</sup>.

Obrázek 1.5b představuje sériovou kinematiku, kde referenční bod zakončuje základní kinematický řetězec mezi polohovacím a orientačním ústrojím. Používají se dva druhy pohybu. Osově specifický pohyb může s každou osou jednotlivě pohybovat v pozitivním i negativním směru (viz. obr 1.5b). Druhý tzv. kartézský pohyb, pohybuje v pozitivním nebo v negativním směru podél os některého souřadnicového systému.

### 1.3 Programování průmyslových robotů

Robot je v dnešní době řízen pomocí programu, vytvořeného uživatelem pro jeho potřeby.

Jednotky lze naprogramovat dvěma způsoby<sup>5</sup>:

- off-line,
- on-line.

Programátor pracující off-line s virtuálním prostředím robota využívá příslušný software, dle zaměření robota, který kompletně vystupní pohled při generování programu pro výrobní a manipulační technologie. U simulačních aplikací vytváří zpětnou kontrolu vygenerované dráhy. Lze tím předejít nežádoucím komplikacím v samotném procesu obrábění, svařování, broušení případně manipulace. Významnou výhodou je možnost neustálé optimalizace pracovních pohybů, která přispívá ke snížení pracovního času.



Obr. 1.6 Posloupnost off-line programování.

On-line programování je přímé ovládání robota zadáním ručního programu nebo pohyby přenášené přes ovládací člen řídicího panelu tzv. teach-pendant.

Off-line programování se dělí<sup>5</sup>:

- oboustranné systémy,
- jednostranné systémy.

Oboustranné systémy (viz. obr 1.7) mají ovládání a programování obdobné on-line režimu. Lze provádět simulaci pracovních drah s využitím totožné kinematiky robota. Tento způsob poskytují pouze výrobci robotů například KUKA a její ulita Sim.Pro + Office.Lite nebo jsou k dispozici univerzální systémy například Delmia a Robcad.



Obr. 1.7 Oboustranný systém off-line programování<sup>5</sup>.

Jednostranné systémy (viz. obr 1.8) pracují na bázi CAD/CAM programu pro tvorbu tvarově složitých drah.



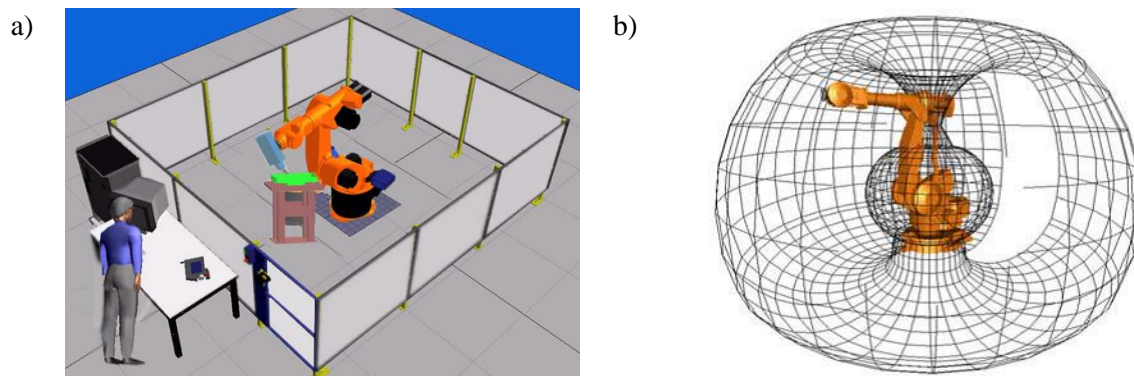
Obr. 1.8 Jednostranný systém off-line programování<sup>5</sup>.

Nejznámější softwarové aplikace pro jednostranné programování off-line jsou například Mastercam, Robotmaster, Delcam + PowerMILL, CAMRob + Tebis.



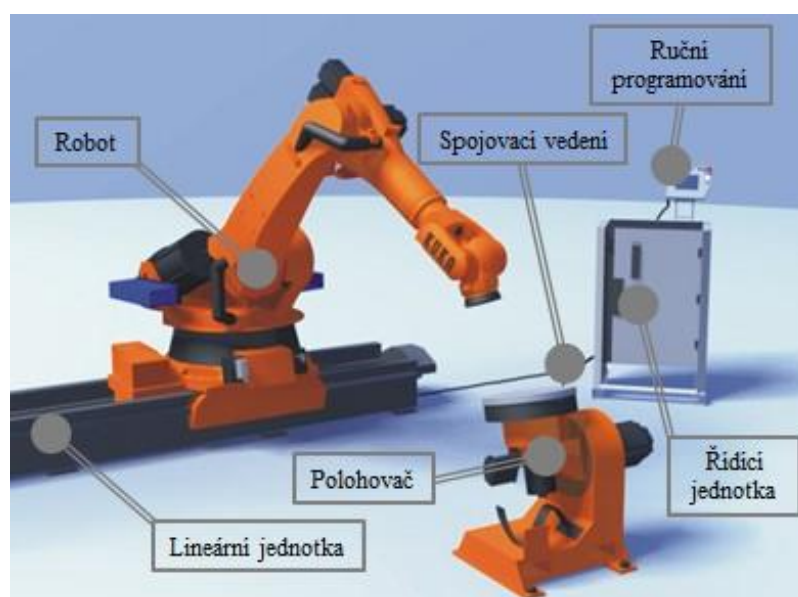
### 1.4 Obráběcí robotické pracoviště

Pracovní zóna je dimenzována na potřebné minimální rozměry a je vůči okolí zajištěna ochranným zařízením. Příkladem je na obrázku 1.9a znázorněna bezpečnostní bariera, která vymezuje ochranou zónu od pracovní.



Obr. 1.9 Robotické pracoviště, a) schématické znázornění<sup>5</sup>, b) pracovní prostor robota<sup>3</sup>.

Běžné pracoviště obsahuje: obráběcího robota, řídicí systém robota, ruční programovatelný přístroj, spojovací vedení, lineární jednotky, rotační stůl, bezpečnostní prvky. Ostatní rozšiřující komponenty zlepšují komfort a efektivitu obrábění, například použití zásobníku nástrojů nebo vzduchové filtrační jednotky.



Obr. 1.10 Základní komponenty robotického pracoviště<sup>5</sup>.

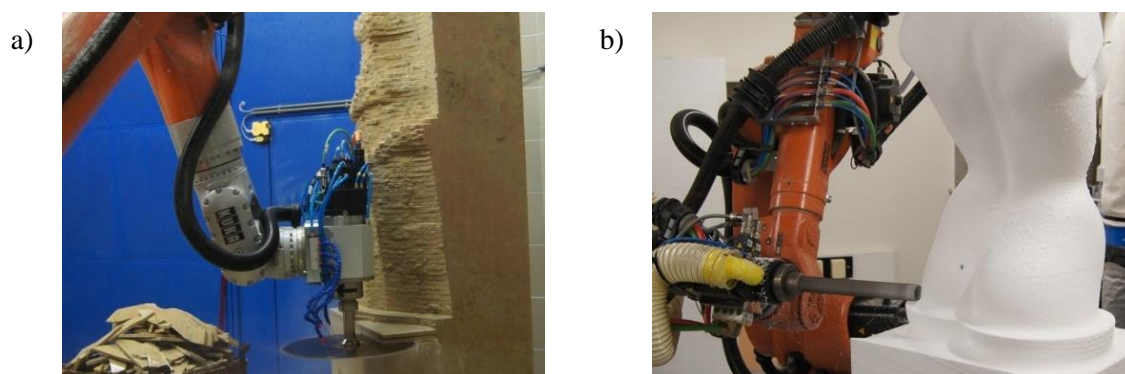
Vhodný návrh pracoviště je cíleně zaměřen pro konkrétní problematiku. Pro lepší využití pracovního prostoru robota, se využívá lineárního pojezdu, který je zobrazen na obrázku 1.10. Tento technologický způsob výroby klade velké prostorové nároky při nižší přesnosti, ale s nadstandartními rozsahy pro obrábění. Často je řešena otázka emulzní kapaliny, která je pro některé obrábění materiálu nezbytná. Kapalina ochlazuje řezný nástroj i vlastní obrobek. Také vyplavuje z místa řezu třísky, které je nutno z kapaliny filtrovat. Jedná se o významné stavební úpravy, které komplikují jednoduchou myšlenku nákupu obráběcího robota.

### 1.5 Posouzení obráběcího stroje

Posouzení obráběcího stroje lze hodnotit z hlediska efektivnosti, výrobnosti a kvality. Hodnotí se též životnost, bezpečnost, snadnost obsluhy i design<sup>6</sup>.

Efektivnost a výrobnost je odvozena z výkonu hnacích elektromotorů, pracovních vřeten a posuvů. Vhodně zvolená řezná rychlost je důležitá pro vysokou produktivitu, trvanlivost nástroje a kvalitu obrobků. Uvedené poznatky závisí na rozsahu otáček vřeten.

Průmyslový obráběcí robot představuje alternativu pro běžné obrábění. Nevýhodou je jeho nízká tuhost a polohová přesnost. Přesto dovoluje obrábět průmyslové materiály o nižší pevnosti. Příkladem je na obr. 1.11 ukázka obrábění dvou mechanicky odlišných materiálů.

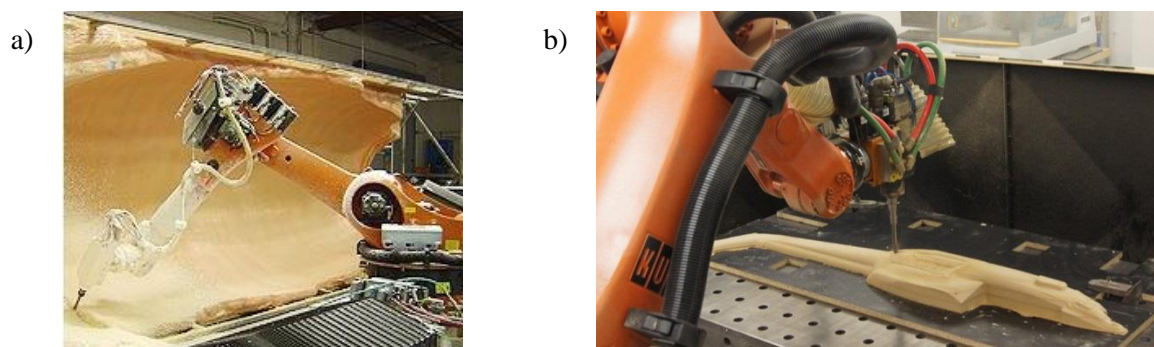


Obr. 1.11 Obrábění robotem, a) polotovár z kamene, b) polotovár z polystyrenu.

Hlavní mechanické vlastnosti soustavy stroje definuje tuhost vhodně navolené konstrukce. Mezi zásadní nevýhodu při použití robotů je právě limitovaná tuhost, která zásadně ovlivňuje možnosti obrábění.

### 1.6 Výkonnost obrábění

Součásti jsou tvarově složitější a je vyžadována vysoká přesnost jejich výroby. Několika metrové součásti, obrobky z jednoho kusu jsou velkou devizou robotického obrábění. Využití robota je oproti násobně dražším konvenčním CNC strojům, výhodnější pro kusové a malosériové objemy, kde je problematická návratnost počáteční investice.



Obr. 1.12 Obrábění robotem, a) velké plochy<sup>7</sup>, b) tvarové díly.

Obráběcí výkon je odvíjen od materiálu obrobku. Vlivem malé tuhosti a přesnosti robota je nutné snížit celkovou řeznou sílu, menším přísuvem a hloubkou záběru. Velikost obráběcích nástrojů je omezena použitým vřetenem a mechanickými vlastnostmi robota. Celkově v porovnání s klasickými stroji, klesá produktivita a roste celkový strojní čas.



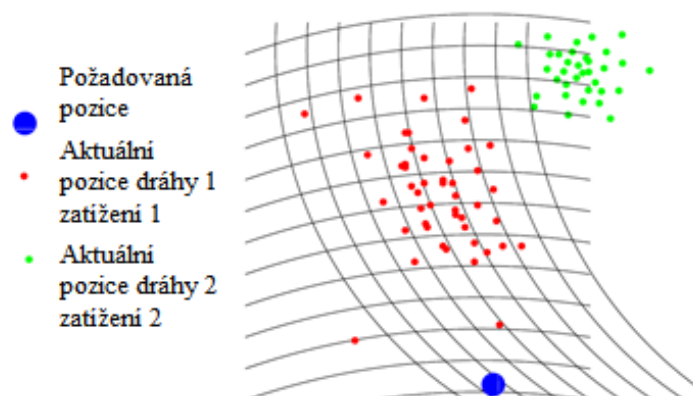
### 1.7 Pracovní přesnost obráběcích robotů

Řada specifických činitelů ovlivňuje výrobní přesnost. Zejména vhodná volba strategie obrábění, tvar obrobku, použitý nástroj a jeho materiál. Problematika technologie a její správný přístup limituje nežádoucí výstupy, na které je konstrukce obráběcího stroje citlivá. Obrábění robotem je výstižný příklad, kde řezné podmínky značně ovlivňují konečný výsledek.

Na pracovní přesnost obráběcího stroje má vliv<sup>6</sup>:

- kvalita zpracování funkčních částí stroje a pečlivé provedení dílčí i celkové montáže,
- tuhost celku i rozhodujících prvků jakými je pracovní vřeteno, ložiska, vodící dráhy,
- přesnost nastavení nástroje vzhledem k obrobku,
- tepelné deformace.

Rozdíl mezi skutečnou polohou a polohou výchozí se nazývá přesnost (viz. obr. 1.13). Opakovatelnost je rozdíl mezi skutečnými polohami při opakovaném najetí do jedné polohy.



Obr. 1.13 Rozdílná přesnost opakované polohy 1(červeně) a 2(zeleně)<sup>8</sup>.

Pro stanovení přesnosti stroje je běžně užívána norma ČSN ISO 230-1. Je zde popsáno měření geometrické přesnosti stroje v podmínkách bez zatížení nebo za dokončovacích operací. ČSN ISO 230-2 definuje standarty přesnosti a opakovatelnosti poloh. Vliv teplot a přesnost kruhové interpolace je uvedeno v ČSN ISO 230-2 a ČSN ISO 230-4. Volumetrická přesnost obráběcích strojů je popsána normou ČSN ISO 230-6.

Volumetrické vlivy nepřesnost zastupují<sup>9</sup>:

- geometrické vlivy,
- teplotní vlivy,
- vlivy upínání obrobku,
- vlivy obráběcího procesu.

Normy se vyvíjí a neustále rozšiřují svojí oblast. Termínem výrobní přesnost je často myšlena pracovní přesností stroje, než reálného výstupu. Technologická a konstrukční doporučení normy neobsahují a nebrání rozvoji této problematiky.

## 2 ROZBOR METOD VYUŽÍVANÝCH K MĚŘENÍ PŘESNOSTI STROJŮ

Konkurence a modernější technologické vybavení, mění zaměření výroby od nízké prodejní ceny, kde domácí firmy obtížně konkurují výrobcům z méně rozvinutých ekonomik, za speciální obrábění s vyšší přidanou hodnotou. Současně při zlepšení kvality, klesá podíl zmetkovitostí a následných reklamací. Uživatel výrobních strojů mnohdy vyžaduje deklarované přesnosti jeho zařízení. Limituje tím vedlejší náklady z důvodu neplánovaného odstavení stroje pro nedostačující výrobní kvalitu, případně pro odstraňování závady vzniklé nevhodným seřizením.

Spolehlivá funkce obráběcího stroje vyžaduje dostatečnou geometrickou přesnost. Problematika představuje kontrolní činnost, mnohdy provozovateli opomíjenou. Cílem metody je zjištění geometrické přesnosti stroje, nového, užívaného nebo po kolizi.

Základní norma pro zkoušení obráběcích strojů je ČSN ISO 230. Obsahuje zásady zkoušek obráběcích strojů.

Metody měření jednotlivých vlastností obráběcích strojů definuje<sup>10</sup>:

- ISO 230-1, Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění,
- ISO 230-2, Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslíkové řízených osách,
- ISO 230-3, Vyhodnocení tepelných vlivů,
- ISO 230-4, Zkoušky kruhové interpolace u číslíkově řízených obráběcích strojů,
- ISO 230-5, Měření emise hluku,
- ISO 230-6, Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn (zkouška diagonálního přestavení),
- ISO 230-7, Geometrická přesnost rotačních os (přesnost vřeten, otočných a naklápěcích hlav a stolů),
- ISO/TR 230-8, Stanovení úrovní vibrací.

Základem úspěšné kompenzace je vždy měření reálného stavu stroje, zejména jeho geometrie, tedy jak je vyroben (přesnost jednotlivých dílců, jejich montáž ve skupině a stroj jako celek), za pohybu os (např. sledování kvality či chyby kruhové interpolace) a za provozu – pracovní přesnost. U víceosých obráběcích center je situace ještě složitější, protože měřitelných odchylek je více než dvojnásobek. Přesnost obráběcích strojů, odborné pojmy, způsoby měření a vyhodnocování sjednocují normy ISO 230-2, VDI/DQG 3441, ANSI B5.54, JIS 6330. Na základě nich výrobci deklarují jak je obráběcí stroj přesný nebo nepřesný<sup>11</sup>.

Pracovní přesnost stroje závisí na teplotní stálosti nosných prvků a stabilitě rozměrů důležitých součástí ovlivňujících polohu nástroje. Normované zkoušky se využívají pro porovnatelnost konečných výsledku, při zavedení jednotné metodiky. ČSN ISO 230 nezakazuje využití jiných metod.

## 2.1 Schlesingerova metoda

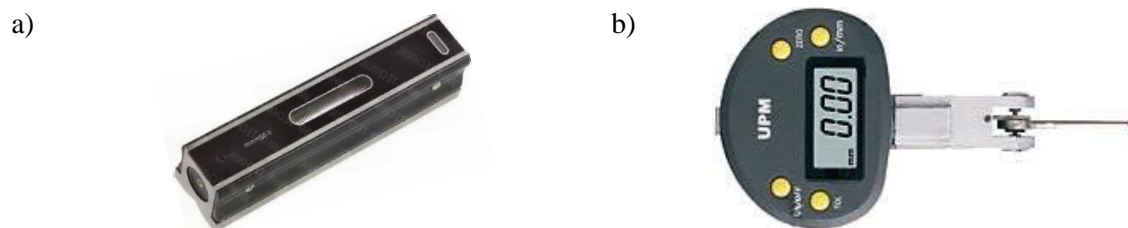
V roce 1932 pan Schlesinger vydal popisy metod pro určení přesnosti strojů. Dnešní postupy měření definují příslušné normy, které moderně navazují na základy vzniklé v 19. století.

Použité nástroje u této zkoušky jsou:

- přesná pravítka,
- přesná libela (viz. obr. 2.1a),
- číselníkový úchylkoměr (viz. obr. 2.1b),
- měřicí trn.

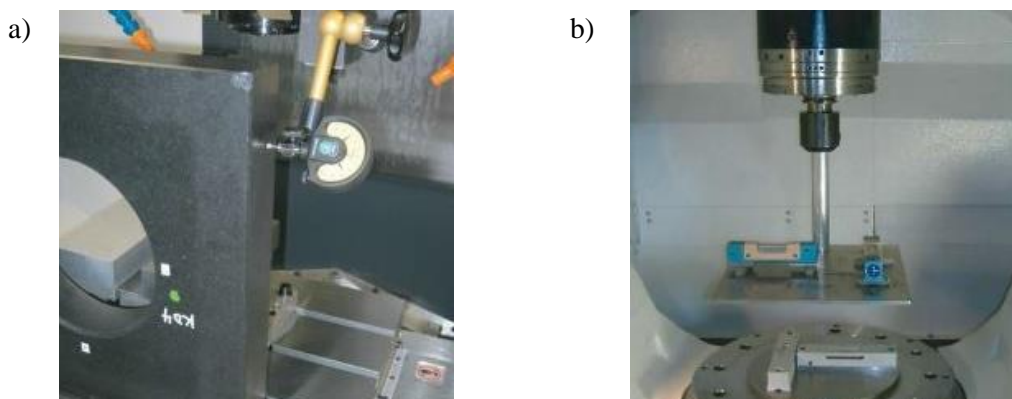
Uvedené měřicí nástroje dlouhodobě patří do základní výbavy servisního technika obráběcích strojů.

Základním krokem je kontrola a seřízení vodorovnosti stroje pomocí libel. Při nepřesném ustavení stroje je lineární pohyb vychýlen a neumožňuje objektivní měření v dalších krocích. Celkovou vodorovnost ovlivňuje ustavení a ukotvení stroje, kde i přesné zařízení vinou špatné polohy, nezachovává požadované polohy. Následuje měření rovinnosti upínací plochy stolu stroje a kolmost vřetena vůči této ploše. Poté se kontrolují kolmosti v souřadných rovinách a obvodové házení vřetena pomocí trnu.



Obr. 2.1 Měřidla firmy Schut<sup>12</sup>, a) strojní podélná vodováha, b) úchylkoměr páčkový.

Mezi hlavní měřené prvky patří přímost, rovinnost, rovnoběžnost, souosost a kolmost. Komplexnost problematiky geometrické přesnosti u víceosých strojů je složitější. U osy naklápění pracovního stolu je nutné zajistit správnou polohu středu, případně o kolik je potřeba změnit odpovídající strojní parametr.



Obr. 2.2 Pomocí libely a vodováhy měřená<sup>13</sup>, a) kolmost, b) vodorovnost.

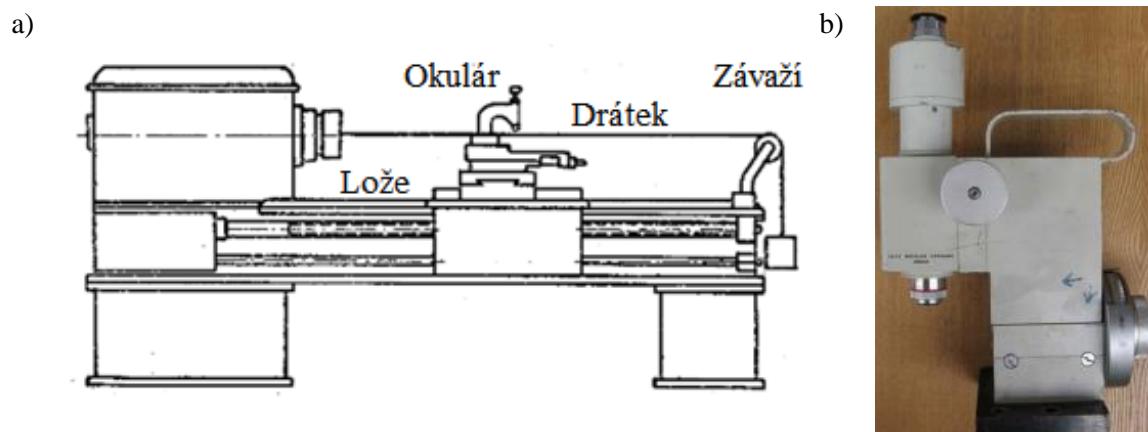
Pro správnou součinnost mezi lineární a rotační osou je důležitá poloha středu rotace v systému stroje. Při vychýlení rotačního středu od skutečné osy na stroji jsou chybně ovlivněné veškeré trajektorie. Měříme pomocí trnu a číselníkového úchylkoměru.

Pro měření přímosti se využívá kalibrované pravítko podepřené ve dvou bodech. Měřicí člen se umístí co nejbližší k měřenému bodu (viz. obr. 2.3a).



Obr. 2.3 Měření přímosti<sup>14</sup>, a) granitové pravítko a indikátor b) paprsek laseru.

Modernější metoda využívá vyrovnávací laser. Zdroj laserova hlava je připevněna místo obrobku a snímací prvek je uložen na pozici nástroje (viz. obr. 2.3b). Jsou změřeny horizontální a vertikální úchyly.



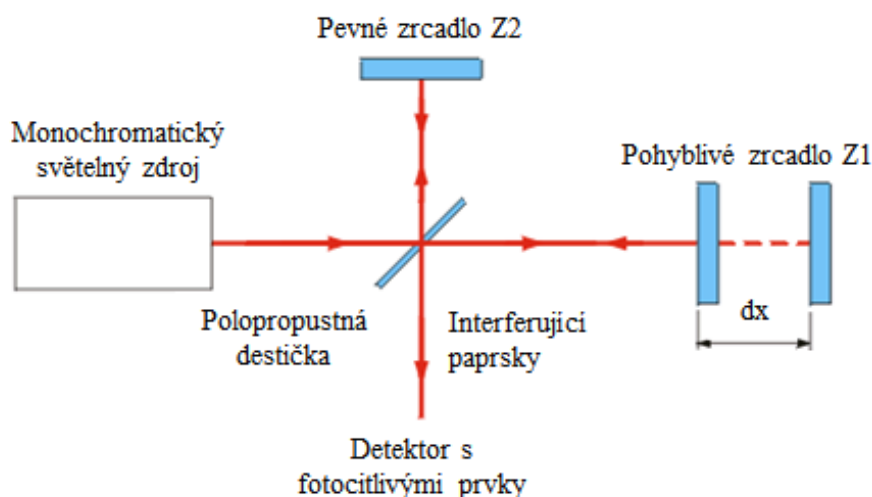
Obr. 2.4 Měření přímosti napnutým drátem<sup>15</sup>, a) schéma, b) mikroskop.

Měření úchyly přímosti na větších strojích je použit natažený drát (viz. obr. 2.4a). Drát průměru 0,1 mm je rovnoměrně napnut ve směru pohybu. Hodnoty jsou měřeny horizontálně umístěným mikroskopem (viz. obr. 2.4b).

Přímost lze také odměřit pomocí dalekohledu s terčem. Terč je upevněn kolmo na osu pohybu, v pozici nástroje se středem, co nejbližší k měřenému bodu. Měřicí člen v tomto případě dalekohled je umístěn na pozici obrobku s rovnoběžným směrem vůči posuvu. Vzdálenost je odečtena přímo na optickém mikrometru nebo nitkovém kříži.

## 2.2 Laserinterferometr

V současnosti laserové systémy disponují vynikajícími vlastnostmi k měření přesnosti obráběcích strojů. Nejčastěji prezentovaný laserinterferometr je laser se stabilizovanou vlnovou délkou o vysokém rozlišení. Zařízení takové přesnosti se využívá pro měření délek a geometrických veličin. Mezi známé výrobce patří např. firma Limtek Laser Division, Renishaw, DEOM, s.r.o., a další



Obr. 2.5 Základní princip interferometrů - Michelson interferometer<sup>16</sup>.

Monochromatický zdroj vyzáří paprsek, který při průchodu polopropustnou destičkou je rozdělen na dva směry. Následně jeden směr dopadá na zrcadlo Z1 a druhý na Z2. Po odrazu se vrací zpět na polopropustnou destičku. Oba paprsky jsou opět odráženy do vyhodnocovací jednotky a část se odráží zpět do zdroje světla.

Vyhodnocující jednotka detekuje interferenci paprsků. Počet interferenčních proužků vzniklých při interferenci na stínítku je mírou změny vzdálenosti pohyblivého zrcadla Z1<sup>13</sup>.

Přesnost interferometru je ovlivněna jeho vlnovou délkou a dalšími faktory<sup>17</sup>:

- prostředí,
- teplota povrchu,
- chyba „mrtvé dráhy“,
- kosinová chyba,
- Abbeho chyba.

Vlivem teplotní změny prostředí se uvádí, že změna teploty prostředí o 1 °C, nebo relativní vlhkosti o 30 % představuje chybu 1 μm. Vzniklé chyby lze kompenzovat, pokud je stav prostředí před začátkem měření určen a v průběhu se nemění<sup>17</sup>.

Teplota povrchu stroje ovlivňuje především kuličkový šroub, který pohybuje saněmi a součinitel teplotní roztažnosti  $1,08 \cdot 10^{-5} \cdot \text{K}^{-1}$  znamená pro dráhu 1000 mm již patrnou změnu délky  $0,0108 \text{ mm} \cdot \text{K}^{-1}$ <sup>17</sup>.

Chyba „mrtvé dráhy“ je spojena se změnou stavu prostředí a souvisí tedy přímo s prvně jmenovaným faktorem. Zobrazení oblasti mrtvé dráhy mezi interferometrem a výchozím bodem je popsána v příloze 1.

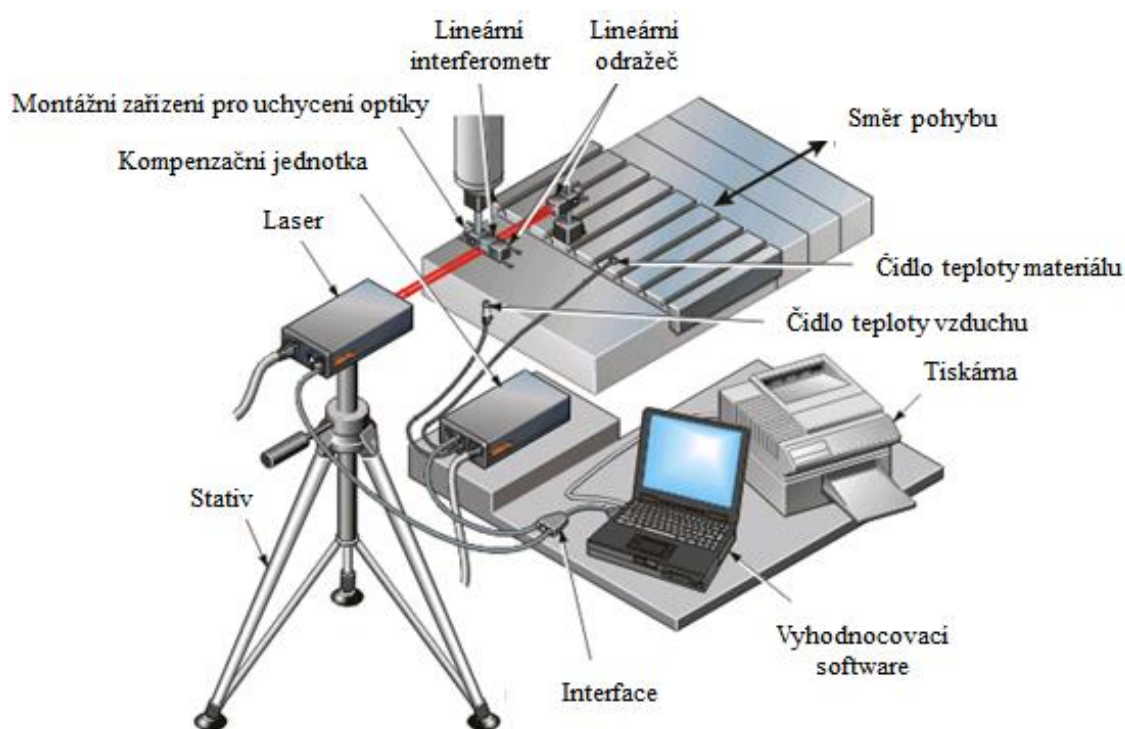
Dochází-li ke změně prostředí, mění se i vlnová délka. Měřicí systém laser interferometru vychází z korekční hodnoty pro nové prostředí ze vzdálenosti  $L_2$ , místo skutečné  $L_1 + L_2$ <sup>17</sup>.

Kosinová chyba je vyvolána nerovnoběžností dráhy paprsku laseru vůči ose pohybu a je definována kosinem úhlu odchylky. Uvedená chyba je graficky popsána v příloze 1.

Abbeho chyba zobrazena v příloze 1, vzniká při úhlovém natočení měřicí techniky. Pro zmenšení vlivu této chyby by laserový měřicí paprsek měl být totožný s linií, podle které je kalibrace prováděna. Pro každou úhlovou sekundu natočení je uvedená chyba přibližně  $0,005 \mu\text{m}/\text{mm}$  posunu<sup>18</sup>.

Lineárního měření lze dle možnosti natočení členit (viz. příloha 1)<sup>16</sup>:

- laserová hlava umístěna ve směru osy měření,
- laserová hlava natočena v pravém úhlu vzhledem k ose měření,
- laserová hlava natočena v obecném úhlu vzhledem k ose měření.



Obr. 2.6 Sestava laserového interferonu pro lineární měření<sup>16</sup>.

Lineární měření pomocí laserového interferonu je vyobrazeno na obrázku 2.6. Sestava obsahuje kromě interferometru a reflektoru pro usměrňování paprsku, také kompenzační jednotku pro minimalizování okolních vlivů. V příloze 2 jsou zobrazeny a popsány možnosti měření interferometrem pro konkrétní případy.



### 2.3 Laser Tracker

S moderním pojetím měření se prezentuje Laser Tracker, který pracuje ve sférických souřadnicích. Principem měření je nepřetržité sledování polohy sondy s koutovým odražečem. Zařízení využívá samostatně nebo v kombinaci interferometr (IFM) a absolutní délkoměr (ADM). Vše je osazeno do jednoho modulu a pozorovací hlava snímá prvotní úhly a vzdálenosti (vzdálenost a 2 úhly). Mezi přední výrobce patří firmy API, FARO, LEICA, jejich produkty jsou uvedeny v tabulce 2.1.

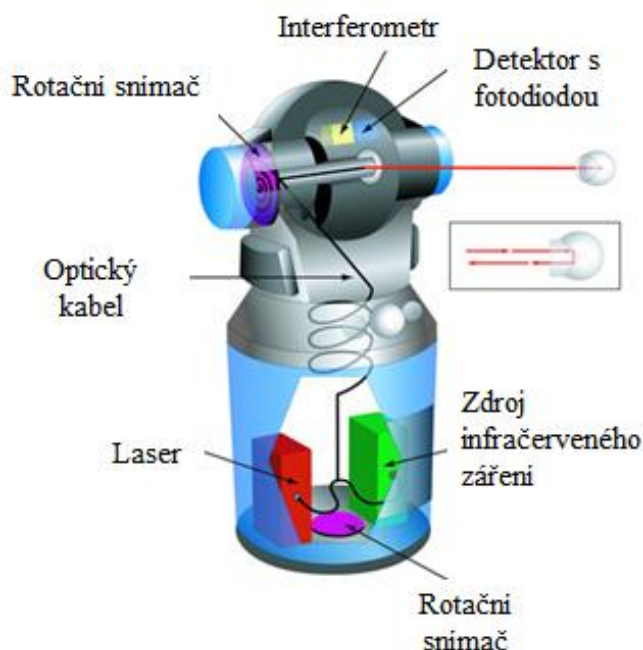
Tab. 2.1 Laser Tracker od renovovaných výrobců na trhu<sup>19,20,21</sup>.

Výrobce	Automated Precision Inc.		FARO Technologies		Leica Geosystems AG	
						
Produkt	Radian	Omnitrac2	Vantage	Ion	AT402	AT901
Obrázek						
Typ laseru	ADM IFM	ADM	ADM	ADM IFM	ADM	ADM IFM
Přesnost měření	$\pm 10 \mu\text{m}$	$\pm 25 \mu\text{m}$	$\pm 16 \mu\text{m}$ $+0,8 \mu\text{m/m}$	$\pm 16 \mu\text{m}$ $+0,8 \mu\text{m/m}$	$\pm 15 \mu\text{m}$ $+6 \mu\text{m/m}$	$\pm 15 \mu\text{m}$ $+6 \mu\text{m/m}$
Měřicí vzdálenost	100 m	200 m	80 m	55 m	320 m	160 m
Rozsah úhlu	$+79^\circ$ $-59^\circ$	$+79^\circ$ $-59^\circ$	$+77,9^\circ$ $-52,1^\circ$	$+72,5^\circ$ $-52,5^\circ$	$\pm 45^\circ$	6 stupňů volnosti
Hmotnost	9 kg	10,9 kg	12,6 kg	19,5 kg	7,3 kg	22 kg

Inkrementální měření frekvenčně stabilizovaným laserem je často přerušeno nestabilitou procesu. Tato hlavní nevýhoda je odstraněna využitím laseru na principu měření absolutní vzdálenosti. Takzvané ADM (Absolute Distance Measurement) zaměřuje paprsek na požadované místo, které je následně změřeno bez ztráty přesnosti. Metodika prošla řadou zlepšujících procesů, přesto nedosahuje přesnosti interferometru.

Vyšší rychlost měření u objemných součástí minimalizuje chybu vzniklou vlivem teplotní roztažnosti, která roste s dobou měření. Zde nachází Laser Tracker své uplatnění a hojně používán v leteckém, stavebním a těžkém průmyslu, pro měření velkých dílů. Laser Tracker API je velice kompaktní zařízení, umístěný v monobloku ze stabilizované slitiny, odolné vůči vnějším vlivům. Měření lze provozovat ve výrobním prostředí s olejovou mlhou a ve svařovnách s elektromagnetickým rušením.

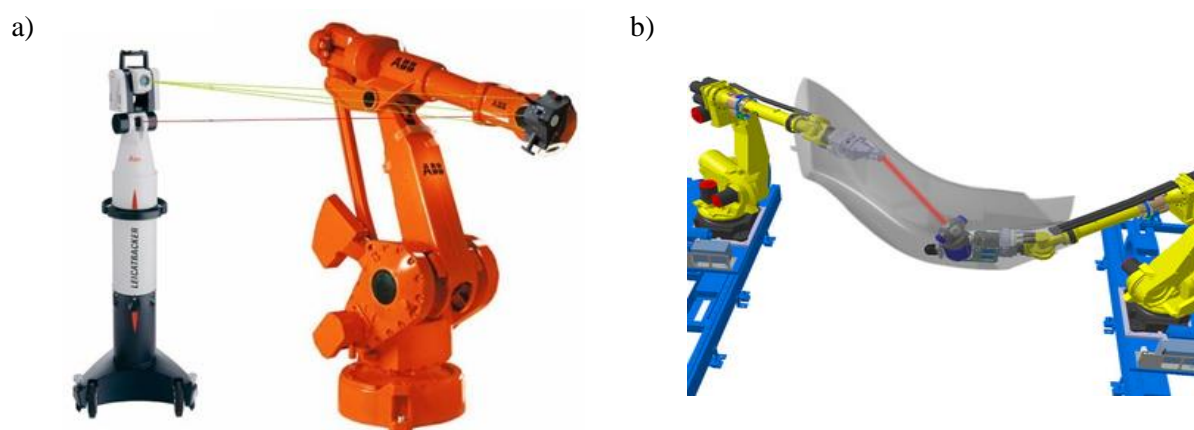
Teplota prostředí limituje měření v extrémních podmínkách, ale pro běžné užívání plně dostačuje. Výrobci se v jejím rozsahu liší, ale obecně je uváděn rozsah  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>20</sup>.



Obr. 2.7 Schéma Laser Trackeru FARO<sup>20</sup>.

Třiosá centra mají 21 chybových parametrů. Mocí laserového interferometru, je každá osa měřena jednotlivě a prodlužuje ztelně dobu měření. Metodika následně podléhá teplotním dilatacím. Víceosá centra mohou mít 40 až 50 chybových parametrů (typické centrum s pěti osami má 43 parametrů)<sup>22</sup>.

Měření 21 chybných členů pomocí interferometru je náročné až neproveditelné. Lepší volbou je použít Laser Tracker, který potřebné množství dat kompenzuje přiřazením určité pozice každému bodu v prostoru.



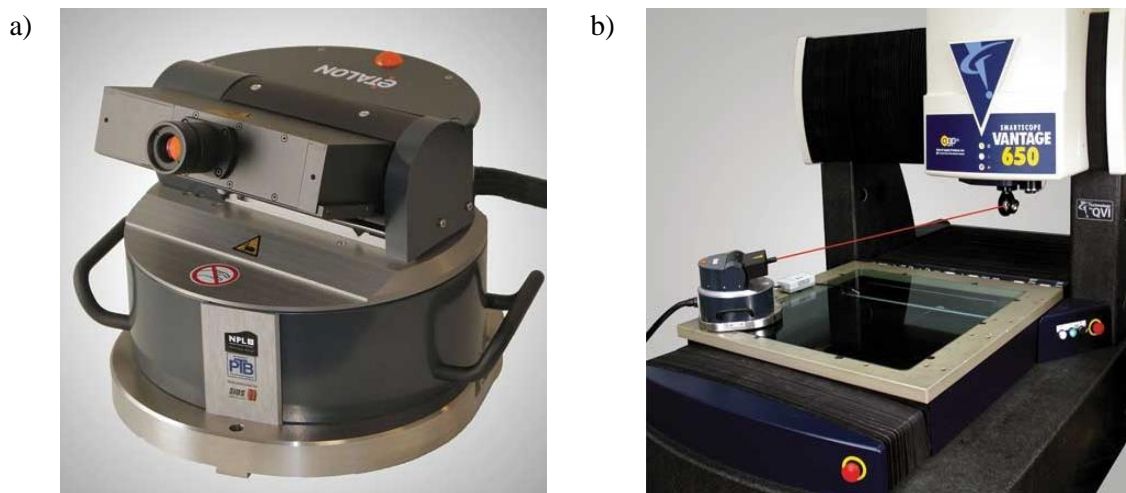
Obr. 2.8 Kalibrace robotů pomocí Laser Trackeru, a) firma Leica<sup>19</sup>, b) firma FARO<sup>20</sup>.

Měření trvá od jedné do tří hodin a obsahuje tři kroky. První a druhý probíhá s upevněním reflektoru na krátkém upnutí. Při třetím běhu je reflektor upevněn na dlouhém upnutí, z čehož vzniknou v každé poloze tři hodnoty a právě i natočení<sup>22</sup>.



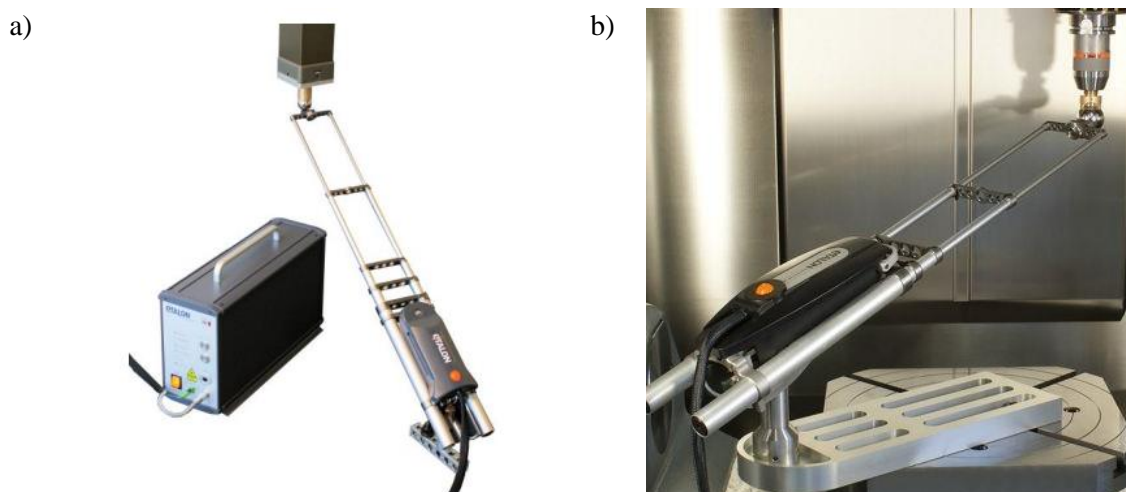
## 2.4 Laser Tracer

Laser Tracer představuje obdobu zařízení Laser Traker, vyvíjena společností ETALON AG (viz. obr. 2.9). Základem metody je laserový interferometr s nanometrovým rozlišením, který automaticky sleduje odražeč umístěný ve vřetení stroje a měří jeho vzdálenost. Pomocí softwaru a GPS jsou změřená data vyhodnocena a nahrána do stroje. Pro dosažení lepší přesnosti než u systému Laser Traker je použito více měření<sup>23</sup>.



Obr. 2.9 Laser Tracer<sup>23</sup>, a) výrobek firmy ETALON AG, b) ukázka kalibrace.

Jádrem Laser Tracer je patentovaná referenční koule, která dosahuje minimální odchylky, menší než 50 nm. Vzniklé mechanické chyby při otáčení os jsou plně kompenzovány. Referenční koule je namontována uvnitř těla systému a slouží jako reflektor pro jeho interferometr. Interferometr dosahuje rozlišení 1 nm při maximálním dosahu 15 m. Teploty, tlaku a vlhkosti se automaticky kompenzují<sup>23</sup>.

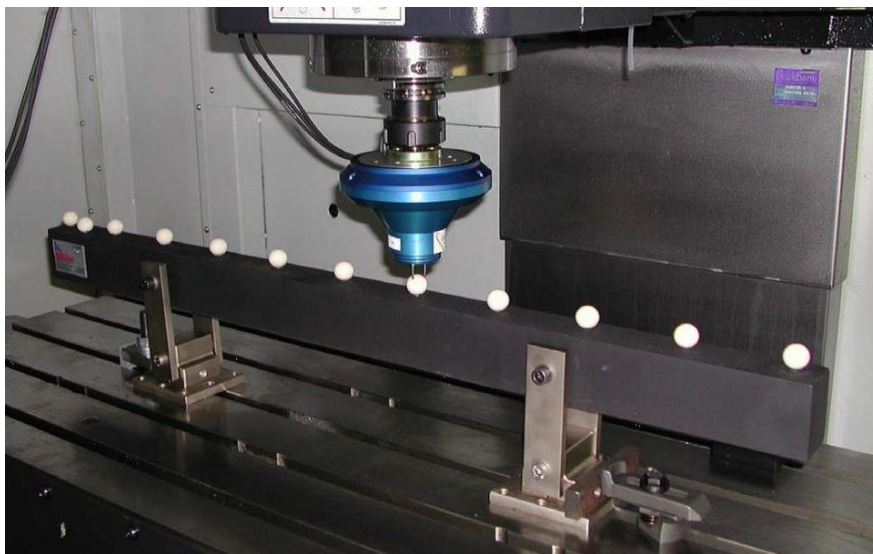


Obr. 2.10 Laser Tracer-MT<sup>24</sup>, a) kompaktní sestava, b) ukázka kalibrace.

Laser Tracer-MT byl navržen pro malé a středně velké stroje, kde pracovní rozsah 260-1000 mm omezuje možnost širšího využití. Je řízen přesnými teleskopickými tyčemi. Díky malým rozměrům (viz. obr. 2.10) má hmotnost pouze 2,5 kg<sup>24</sup>.

## 2.5 Samocentrovatelná hlava s využitím artefaktu

Základem samocentrovatelné hlavy jsou prostorově orientované snímání doteky. Jedná se o vysoce přesné kapacitní sondy rozmístěny do úchopné hlavice pro snímání kulového artefaktu. Samocentrovatelná hlava se upíná do vřetena a měřené artefakty se běžně uspořádají do delší řady s několika měřicími elementy o přesné rozteči. Takzvaný kalibrační artefakt (viz. obr. 2.11) je upevněn na pracovní stůl stroje ve směru měřené osy. Je vytvořen měřicí program pro najíždění nad jednotlivé elementy s vertikálním pohybem měřící hlavy.



Obr. 2.11 Samocentrovatelná hlava a kalibrační artefakt<sup>25</sup>.

Kombinace jednoho kulového elementu a měřící hlavy se využívá u pětiosých strojů. Na obrázku 2.12 jsou zobrazeny měřící hlavy firmy IBS Precision Engineering. Hlavní výhodou zařízení Position inspector (viz. obr. 2.12a) je rychlost měření tříosých strojů. Zaznamenání deseti pozic, lze dosáhnout do jedné minuty s přesností 0,2  $\mu\text{m}$ .

a)



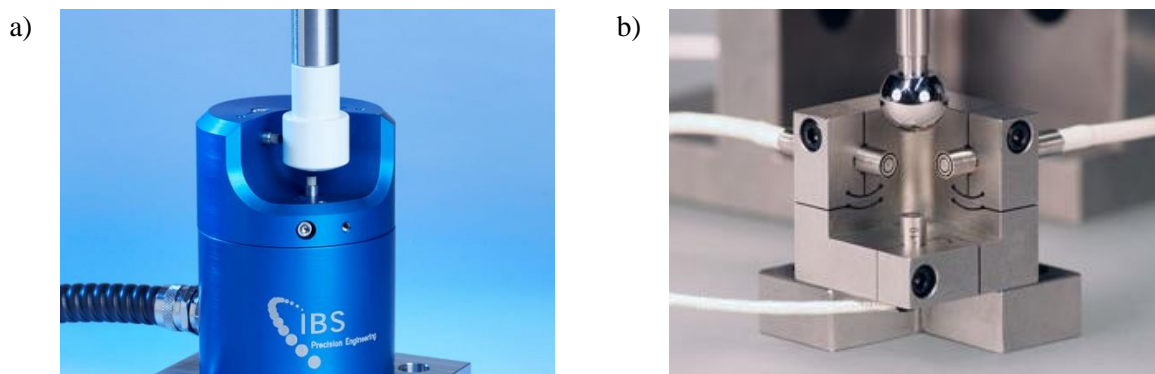
b)



Obr. 2.12 Produkty IBS Precision Engineering<sup>26</sup>, a) Position inspector, b) Rotary axis inspector.

Pro měření přesnosti ve vysoké rychlosti slouží Rotary axis inspector (viz. obr. 2.12b). Hodnotu kompenzace obvodového házení pomocí této metody, lze získat během výrobního procesu bez dlouhodobého odstavení stroje.

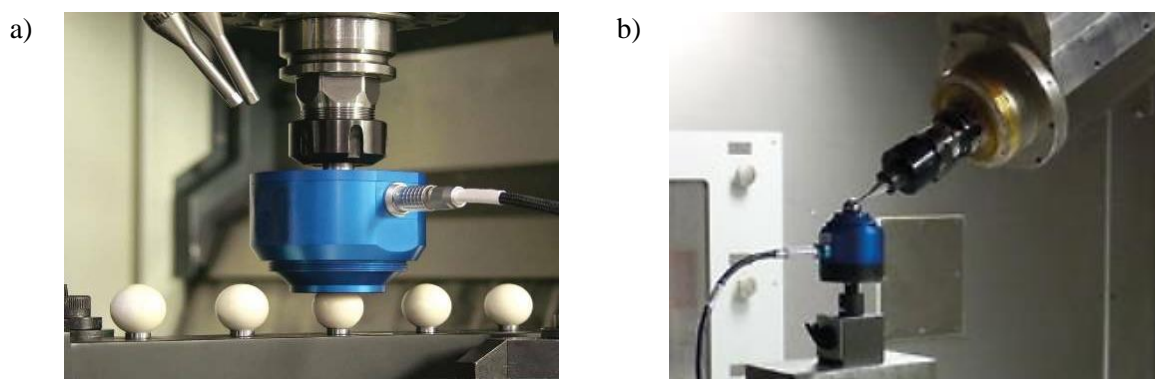
Vřetena jsou důležitou součástí každého stroje a jejich výkon je klíčový parametr kvality i produktivity výroby. Mnohdy mohou představovat významnou část nákladů stroje. Spindle inspector (viz. obr. 2.13b) představuje rychlou kontrolu stavu, přesnosti a výkonnosti vřetena. Jednoduše se zavádí do výrobního programu stroje s minimálním dopadem na výrobní čas. Měření probíhá na speciálním místě přímo ve stroji a dosahuje přesnosti  $0,075\mu\text{m}$ . Měřicí válec je vždy k dispozici v zásobníku stroje. Kromě přesnosti tříosého systému je měřen i dynamický výkon vřetena<sup>26</sup>.



Obr. 2.13 Produkty firmy IBS Precision Engineering<sup>26</sup>, a) Spindle inspector, b) Spindle analyzer.

Speciální Spindle analyzer (viz. obr. 2.13b) je vyvinut pro specifické potřeby metrologie, kde poskytuje vysoké přesnosti. Testy splňují normu ISO 230 a pomocí kompletní diagnostiky poskytují laboratorní výsledky s rozlišením nanometrů. Zařízení lze využít pro měření dynamického výkonu vřetena a měření tepelných dilatací.

Position analyzer (viz. obr. 2.14a) také splňuje normu ISO 230. Je ovšem zaměřen, pomocí kalibrovaných elementů, na hlubší analýzu a diagnostiku lineárních os stroje. Uhlíkové koule mají průměr 22 mm a dle použité měřicí hlavy je dosahováno přesnosti  $0,2\mu\text{m}$  až  $0,1\mu\text{m}$ <sup>26</sup>.

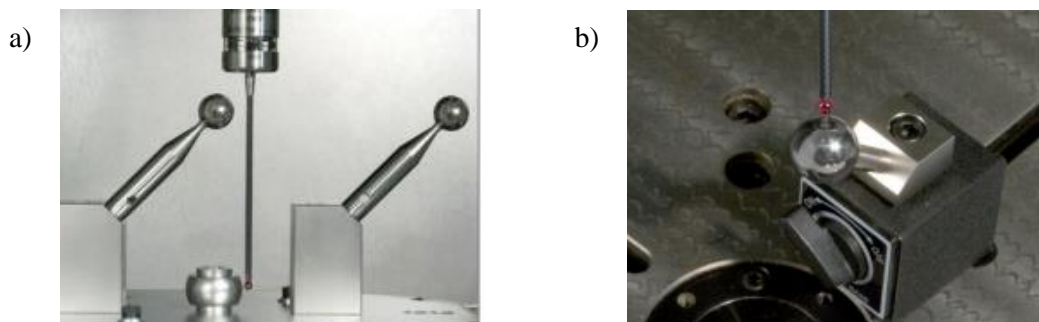


Obr. 2.14 Produkty firmy IBS Precision Engineering<sup>26</sup>, a) Position analyzer, b) Rotary axis analyzer.

Pro rozsáhlejší měření strojů s pěti osami je nabízen Rotary axis analyzer (viz. obr. 2.14b). Sonda měří skutečnou polohu středu kalibrované koule. Je považována za velmi efektivní nástroj pro kontrolu kvality kinematické přesnosti stroje. Dle výrobce jsou testy v souladu s ISO 10791-6. Měří se statické a dynamické hodnoty otočného stolu nebo otočného vřetene, případně kombinace stolu a vřetene. Přesnost je ovlivněna druhem připojení sondy, kde kabelové sondy dosahují vyšší přesnosti  $0,6\mu\text{m}$  a bezdrátové sondy  $1,0\mu\text{m}$ <sup>26</sup>.

## 2.6 Měřicí sada Renishaw Axi-set

Měřicím prvkem je přesná tenzometrická sonda společnosti Renishaw s prostorovým artefaktem. Sonda je upnutá ve vřetení a využívá se pro rychlé a přesné měření stavu středů otáčení rotačních os u pětiosých strojů (viz. obr. 2.15). Hlavní výhodou je rychlost měření v řádech několika minut. Díky dlouhé sondě lze měřit kritické polohy stroje.



Obr. 2.15 Měřicí sada Renishaw Axi-set, a) detail měření<sup>13</sup>, b) kompaktní kalibrační koule<sup>27</sup>.

Postup vyhodnocuje úchytky uložení kolébky a otáčení stolu v jednotlivých souřadných rovinách, úchytky nastavení základních poloh kolébky (svislá, vodorovná), určení středů otáčení rotačních os a další<sup>13</sup>. V příloze 3 je znázorněn ucelený postup měření.

## 2.7 Měřicí systém Renishaw ballbar

Systém Ballbar QC20-W (viz. obr. 2.16a) měří díky přesnému teleskopickému snímači velmi malé změny poloměru naprogramované dráhy. Snímač je upnutý mezi dvojicí přesných koulí na obou koncích (viz. obr. 2.16b).



Obr. 2.16 Měřicí systém Renishaw Ballbar QC20-W<sup>28</sup>, a) teleskopický snímač, b) kompletní systém.

Koncový software vypočítá konečné hodnoty přesnosti kruhovitosti. Metoda splňuje mezinárodní normy jako ISO 230-4, ČSN ISO 230-4, ASME B5.54<sup>28</sup>. (viz. příloha 3)

Kalibrátor s minimální teplotní deformací je dodáván se všemi soupravami a slouží k délkové kalibraci teleskopického snímače<sup>28</sup>.

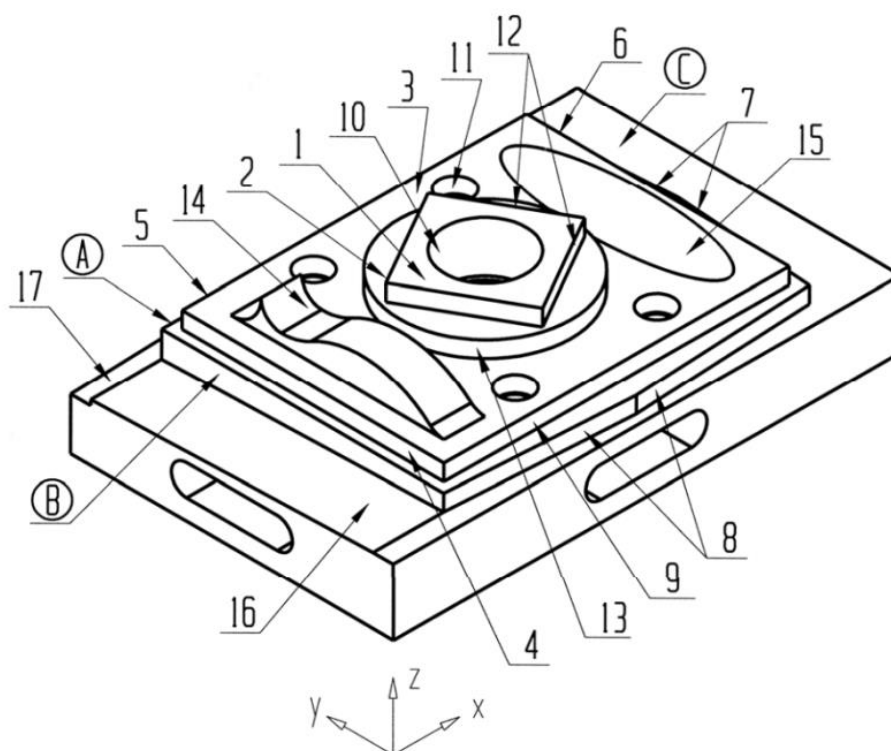
Uvedená přesnost měření  $\pm 1,25 \mu\text{m}$  je dosažena při  $20^\circ\text{C}$ . Maximálně měřený rozsah  $\pm 1,0 \text{ mm}$  je limitní. Systém disponuje bezdrátovým snímáním dat. Kulové konce umožňují natáčení teleskopu až do  $220^\circ$  vůči středové ose a lze měřit ve třech kolmých rovinách, bez změny polohy středového upínače. Měření lze užít pro dráhu o částečném oblouku  $220^\circ$  a nebo klasické testování s uzavřenou trajektorií  $360^\circ$  (viz. příloha 3). Běžná souprava obsahuje sestavu 100 mm dlouhého snímače a délkové nástavce o 50, 150 a 300 mm rozměrech. Kombinací nástavců se zlepšuje využitelnost soustavy a lze provádět testy o poloměru 100, 150, 250, 300, 400, 450, 550 a 600 mm. S dalšími prodlužovacími nástavci lze testovat až do poloměru 1350 mm<sup>28</sup>.



## 2.8 Přesnost strojů výrobou zkušebního obrobku

Zkušební vzorek je obroben dokončovací operací, pro kterou byl konstrukčně navržen. Neopomíjí se stav nástroje a jeho upnutí. Norma ISO 10791-7 uvádí standardizovaný zkušební obrobek a dokončovací zkušební podmínky v závislosti na normě ISO 230-1, která definuje stav stroje před zkouškou.

Technologický postup obrábění je volen dle potřeb odvozených z praxe. Zkoušky lze řadit v libovolném systému. Měřicí přístroje nejsou definovány. Je ovšem nutné zajistit dostatečnou přesnost, norma uvádí rozlišovací schopnost 0,001 mm a lepší. Zkoušku lze měnit dle požadavku a její rozsah upravit<sup>29</sup>.



Obr. 2.17 Příklad návrhu zkušebního obrobku<sup>9</sup>.

Tvar zkušební obrobku může být navrhnout ve více velikostech v závislosti na účelu a využití měřeného stroje (viz. obr. 2.17). Není-li požadováno statické měření přesnosti stroje, neměl by být od každého typu obrábění více jak jeden obrobek. Obdobně je voleno umístění obrobku, kde pro běžné potřeby je umísťován do středu poloh souřadnic X a Y. Výška horizontální osy Z závisí na způsobu upnutí a délkové korekci použitého nástroje<sup>29</sup>.

Volba nástroje a materiálu obrobku, není-li požadována zadavatelem, se navrhuje v širším zájmu pro konkrétní výrobní stroj. Řezné podmínky respektují vybraný materiál a fázi pro dokončovací obrábění. Pro všechny obráběné zkušební povrchy může být použit stejný nástroj, například čelní válcová fréza s řeznou hranou dlouhou 35 mm o průměru 30 mm<sup>29</sup>.

Řezná rychlost pro litinu by měla být přibližně 50 m/min, pro hliník 300 m/min. Posuv na zub by měl být 0,05 mm až 0,1 mm<sup>29</sup>.

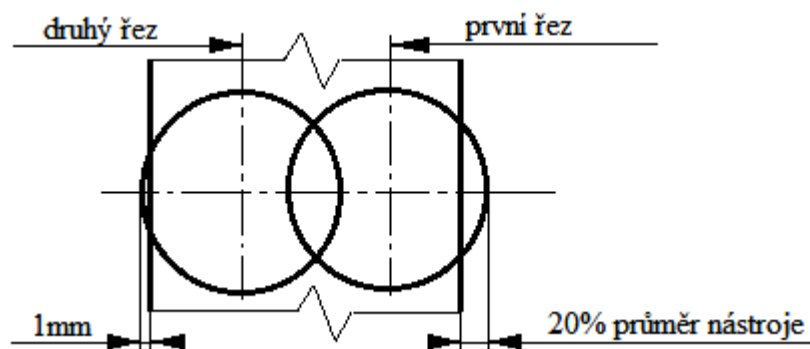
Hloubka řezu v radiálním směru by neměla být pro frézovací operace 0,2 mm a asi 6 mm v axiálním směru pro frézování bočních ploch podle vnějšího čtverce<sup>29</sup>.

Upnutí zkušebního vzorku je navrženo pro zajištění stabilní a rovnoměrné polohy vůči obráběcí ploše. Vhodné je využití zahloubených šroubů a specifického přípravku pro obrábění střední díry v její plné hloubce. Volba tvaru a počet obráběcích drah je navrženo pro zjištění požadované přesnosti stroje. Cílem ISO 10791 jsou požadavky při minimálních nákladech na měření přesnosti stroje.

Podmínky použité pro výsledné obrábění ve vztahu ke geometrické přesnosti stroje<sup>30</sup>:

- Stroj se musí pohybovat pomalu chovat se kvazistatickým způsobem, tj. bez dynamických vlivů a servořídících omezení. Toto ustanovení není ovšem použitelné pro provedení některých zkoušek specifických pro určité druhy obráběcích strojů (např. pětiosé tvarové zkušební kusy) kde je cílem zkoušet vlastnosti stroje při určených posuvech dráhy nástroje.
- Obráběcí stroj by neměl být ovlivňován velkými obráběcími silami, což je případ pro většinu dokončovacích operací.
- Obráběcí stroj by neměl být ovlivněn jakýmkoliv tepelným zatížením, stroj by měl být v teplotně stabilních podmínkách.
- Nástroj a řezné parametry, tj. posuv, rychlost, geometrie nástroje atd., by měl být vhodný pro obrábění materiál a odpovídat jmenovitým hodnotám,
- Obráběný materiál by měl být homogenní, tj. parametry jako tvrdost a pevnost by se neměly měnit na obráběném povrchu.
- Použitý nástroj by neměl být opotřeбенý, neměl být významně opotřebováváný během obrábění zkušebních kusů.

Několika násobné obrábění jednoho tvaru zkušebního obrobku požaduje maximální rozměrovou změnu 10% vůči předpisu uvedené v normě ISO 10791. Zkušební obrobek pro měření a nastavení polohy využívá vrtání několika děr a dokončovací obrábění tvarových profilů. Cílem je popsat chování stroje za definovaných kinematických podmínek posuvu v jednotlivých osách nebo při vzájemné interpolaci a jednotlivé kruhové interpolaci. Měření nejčastěji probíhá v souřadnicovém systému os X a Y. V případě několika kinematické soustavy stroje, lze zařadit více pracovních rovin<sup>29</sup>.



Obr. 2.18 Zkouška čelním frézováním<sup>29</sup>.

Druhý tvar zkušebního obrobku pro měření čelního házení ověřuje rovinnost ploch obrobené dvěma řezy s překrytím odpovídající 20% průměru použité frézy (viz. obr. 2.18). Dva modely s různými rozměry zkušebního vzorku jsou vhodně navoleny pro použité nástroje a s přihlédnutím na zaměření obráběcího stroje<sup>29</sup>.

### 3 NÁVRH METODY MĚŘENÍ PŘESNOSTI VÝROBOU ZKUŠEBNÍHO OBROBKU

Měřicí postupy uvedené v diplomové práci jsou navrženy s ohledem na vybavení a časové možnosti firmy MCAE Systems s.r.o.

Teoreticky je metoda popsána v předchozí kapitole 2.8. Pro účely diplomové práce je zohledněna norma ISO 10791-7, která dovoluje mnohé úpravy dle požadavků zadavatele. Cílený postup s případnými návrhy je popsán v souladu s uvedenou normou.

#### 3.1 Účel metody

Ověření přesnosti robota metodou výroby zkušebního obrobku je měření, které určuje jeho přesnost při obráběcím procesu. Měření ovlivňují okolní vlivy zvolené technologie. Lze tak docílit přesnějších hodnot potřebných pro optimalizaci výrobního postupu, případně zvolené technologie. Zákazník nebo uživatel vyžadující specifické údaje konkrétní problematiky obrábění, může vhodným návrhem obrobku a metody obrábění limitovat oblast metodiky měření za jeho zvolených podmínek.

#### 3.2 Upřesnění metody

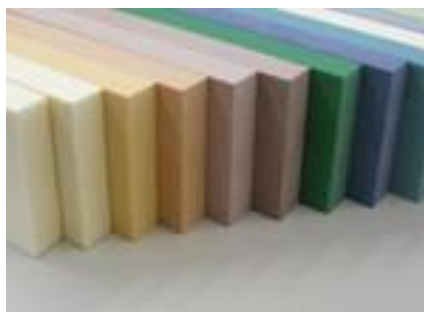
Měřené hodnoty jsou uvedeny v milimetrech, úhlové jednotky ve stupních. Postup zkoušek je volen dle libovolného pořadí. Pro porovnání nebo pro statistické účely je doporučeno zachovat jednotnou posloupnost a vyloučit případné nepřesnosti vlivem odlišného postupu.

Rozsah měření není směrodatně určen a lze ho přizpůsobit požadavkům uživatele. Měření zkušebního obrobku se vztahuje k celkovému rozsahu zkoušky a možnostem měřících metod. Norma doporučuje volit číselníkové úchylkoměry s přesností 0,001 mm a lepší. Pro potřeby měření robotů je tato hodnota nadsazená a mnohá měřidla této přesnosti nedosahují.

Bude provedeno pět měření na jednom polotovaru, při kterém je odebrán jeden milimetr. Postup šetří množství obráběného materiálu, ale vyžaduje více času při programování drah a modelování zkušebních obrobků s jednotlivými přídávky. Výsledné hodnocení nesmí opomenout modifikovaný tvar o přírůstek na každou operaci.

#### 3.3 Výběr obráběného materiálu a umístění polotovaru

Materiál je volen s ohledem na minimální vliv řezného procesu. Snahou je minimalizovat řezné síly, které negativně ovlivňují přesnost stroje.



Obr. 3.1 Vzorník PUR materiálu<sup>31</sup>.

Pro zařazení významného vlivu řezných sil, je volen odolnější materiál, případně materiál používaný při konečné výrobě ke zjištění praktické přesnosti. Cílová volba závisí na zadavateli měření.

Umístění zkušebního obrobku v pracovním prostoru obráběcího robota je doporučeno volit na střed osových souřadnic. Vhodná poloha je zobrazena na obrázku 3.2.



Obr. 3.2 Ustavení zkušebního měření v obráběcím prostoru stroje.

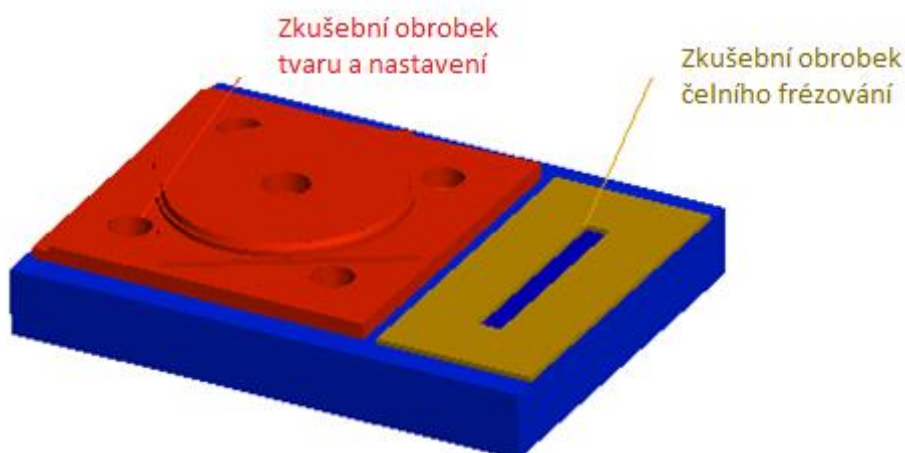
Pro objektivní porovnání je vhodné zajistit pozice nejčastěji použité při běžné výrobě. Extrémní polohy umístění se využijí pro ověření přesnosti v celém rozsahu obráběcího prostoru.

### 3.4 Rozměry a tvar zkušebního obrobku

Zkouška určuje chování stroje při různých pohybech, s cílem posouzení jednotlivých nepřesností robota na zvoleném tvaru obrobku. Z definice je patrná důležitost zvoleného tvaru v celkovém zhodnocení měření. Tvar uvedený v normě ISO 10791-7 porovnává měření při posuvu v jedné ose, při interpolaci dvou souřadnic a při kruhové interpolaci. Důvodem je případné určení zdroje nepřesností u tříosých obráběcích strojů.

Zkušební obrobky se dělí dle způsobu obrábění:

- zkušební obrobek tvaru a nastavení,
- zkušební obrobek čelního frézování.

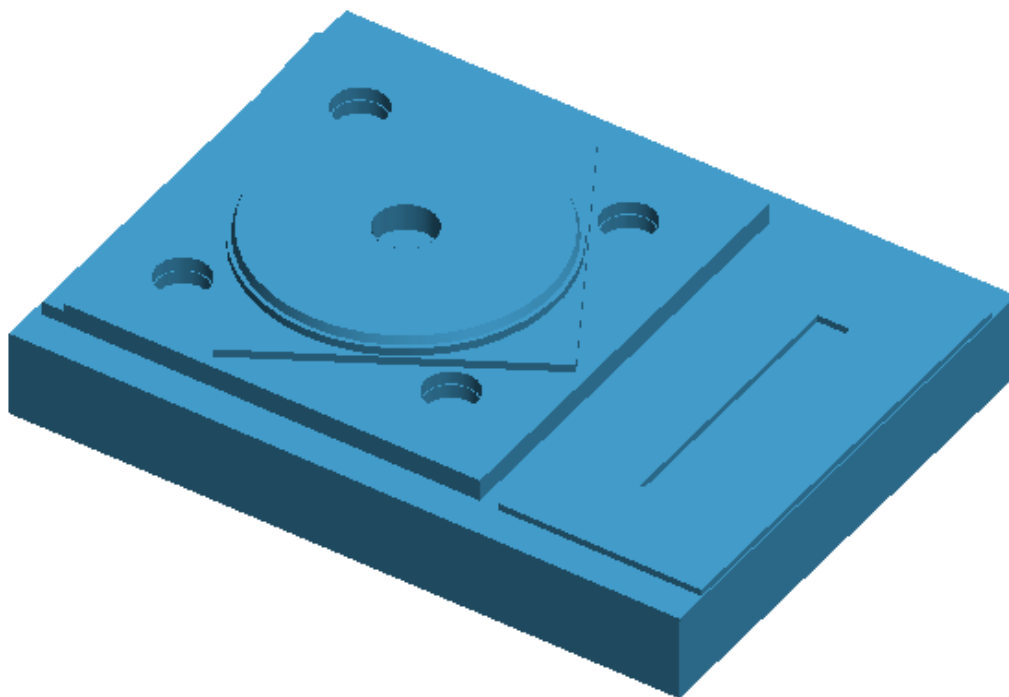


Obr. 3.3 Části zkušebního obrobku.

Zkušební obrobek lze obrábět několikrát, ale pro reprezentativní účely musí být dodrženy rozměry uvedené v ISO 10791-7. Je připuštěna maximální  $\pm 10\%$  odchylka vůči konečnému rozměru. V této normě jsou uvedeny dva rozměrově odlišné obrobky a pro měření přesnosti robota je vhodné použít větší rozměr zkušebního tvaru<sup>29</sup>.



Tato metoda využívá obě zkoušky. Pro jednodušší postup a časovou úsporu je zvolen obrobek obsahující oba typy. Měření tvaru a nastavení je společně s ověřením čelního frézování v jednom obrobku. Bude ušetřen čas za ustavení druhého polotovaru a nastavení společného souřadného systému. Návrh zkušebního vzorku je zobrazen na obrázku 3.4 a výkres přiložen v příloze 6. Konečný tvar normovaného obrobku je upraven pro potřeby robotického obrábění a řezných nástrojů. Jmenovitý rozměr tvaru je 322 mm.



Obr. 3.4 Návrh zkušebního obrobku.

Pro čelní frézování, kde fréza o průměru 52mm nahrazuje předepsanou frézu o průměru 50mm, je upravena šířka obráběcí plochy pro dodržení definovaného poměru. U ověření víceosého obrábění je přidáno kruhové sražení, které prověří přesnost robota v kinematicky náročné operaci. Pro ostatní operace dostačuje tříosé uspořádání.

Základní měřené tvary jsou:

- vnější čtverec o straně 322 a hloubce 6 mm,
- skloněné plochy o úhel  $3^\circ$  a hloubce 6 mm ze dvou stran vnějšího čtverce,
- čtyři otvory o průměru 43 mm hloubce 10 mm,
- čtyři otvory o průměru 41 mm hloubce 10 mm,
- skloněný čtverec pod úhlem  $75^\circ$  a délce strany 222 mm,
- kružnice na skloněném čtverci o průměru 218 mm a hloubce 6 mm,
- kruhové sražení  $20^\circ$  o průměru 209,5 mm a hloubce 6 mm,
- otvor na čelní ploše o průměru 48 mm a hloubce 20 mm.

Je nutné upozornit, že uvedené rozměry jsou pro konečný tvar. Pro několikanásobné obrábění a měření jsou plochy nadsazeny o přídavek 1 mm na operaci.

### 3.5 Obráběcí nástroj

Volba nástroje není definována za předpokladu obrobitelnosti navrhnutého tvaru. Pro obrábění do pěnového polyuretanu dostačuje rychlořezná ocel bez povlaku.

Navržený tvar obrobku je volen pro obrábění frézou o průměru 10 mm o minimální hloubce 10 mm.



Obr. 3.5 Nástroje pro zkušební měření.

Čelní frézování je navrženo pro použití frézy s vyměnitelnými kruhovými destičkami o průměru frézy 52 mm. Oba nástroje jsou zobrazeny na obrázku 3.5.

### 3.6 Volba řezných podmínek

Řezné podmínky jsou voleny dle parametrů osazeného vřetena, řezného nástroje a obráběného materiálu.

Zvolený postup metody obsahuje test vlivu řezné rychlosti na přesnost obrábění robotem. V uvedeném případě metoda používá několika řezných rychlostí při stejném úběru materiálu na břit nástroje.

Pro jednoúčelové použití metody je volena řezná rychlost dle použitého nástroje a obráběného materiálu. Norma ISO 10791-7 uvádí pro litinu kolem 50 m/min a pro hliník 300 m/min. Posuv nástroje na zub je volen 0,1 mm. Hodnoty jsou pouze informativní a pomocí uvedené metody lze optimalizovat řezné podmínky pro konkrétní aplikace<sup>29</sup>.

Úběr materiálu je pro potřeby frézování robotem odvozen od přídavku na dokončování. V závislosti na obráběném materiálu je nejčastěji použit 1mm pro dokončovací operace.

### 3.7 Technologický postup obrábění

Před programováním drah je navržena posloupnost kroků obrábění a měření. Postup a výběr operací lze přizpůsobit pro konkrétní pracoviště a jeho výbavu. Uvedené body jsou voleny pro obrábění a měření na pracovišti firmy MCAE systém, kde zvolená metodika měření není v praxi zcela běžná. Zkušební obrobek je v konkrétním případě navrhnout pro čtyři měření.

Návrh postupu výroby a měření zkušebního obrobku:

- dělení polotovaru,
- orovnění polotovaru,
- upnutí polotovaru,
- definování počátku souřadného systému,
- hrubování d18,
- hrubování d10,
- dokončování\_1\_ d10,
- dokončování\_1\_ d52,
- měření\_1,
- dokončování\_2\_ d10,
- dokončování\_2\_ d52,
- měření\_2,
- dokončování\_3\_ d10,
- dokončování\_3\_ d52,
- měření\_3,
- dokončování\_4\_ d10,
- dokončování\_4\_ d52,
- měření\_4.

### 3.8 Upnutí zkušebního obrobku

Obrobek je nutné zajistit proti posunutí. Běžně použité upínky vyžadují úpravu polotovaru o upínací plochy. Opakované měření pro jednodušší a rychlejší definování souřadného systému upřednostní speciální přípravek.

Běžné robotické pracoviště je vybaveno pracovním stolem, který dovoluje upnutí polotovaru pomocí zápusných šroubů. Polotovar je zajištěn ke stolu několika šrouby opatřenými vhodnými podložkami. Uvedený postup lze zvolit v případě nenáročného obrábění, kde obrobek není příliš zatěžován. Velké úběry materiálu, vysoká řezná rychlost mají vliv na způsob upnutí, ale prioritní parametr je obráběný materiál a jeho tvar. V případě obrábění polystyrenu je použita oboustranně lepicí páska, která musí být kvalitní a vhodně použita. Je nutné počítat při odstranění pásky s nechtěnou deformací upínací plochy, kde se s páskou odstraní i částice materiálu přilepeného obrobku.

### 3.9 Určení souřadného systému

Vhodně zvolený počátek souřadného systému je důležitým prvkem celé metody. Cílem je použít jeden souřadný systém pro obrábění a měření. Bod je vhodné umístit na místo, kde je snadno přístupný a jednoznačně definovaný.

### 3.10 Upřesnění metody

Uvedená metoda i norma ISO 10791 nezavazuje pro kontrolu přesnosti stroje využití software pro generování NC kódu. Vhodný výběr postupu naprogramování obráběcího stroje je na zvážení zadavatele. Je vhodné přizpůsobit proces zkoušení technologickým postupům běžně využívaných v praxi pro docílení objektivního měření.

Lepší využitelnost práce a materiálu je dosažena několika stupni měření na jednom obrobku. Diplomová práce bude měřit 4 tvary odstupňované o přídavek 1mm, které nejsou zavazující a dle rozměru zkušební obrobku lze zkoušet více nebo méně operací na jednom polotovaru.

Pro každý tvar jsou vygenerovány programy a pomocí CAD/CAM softwaru a následně převedeny na řídicí program robota. Cílem není určovat metodiku programování a její vliv na výslednou přesnost měření, ale je vhodné volit takové postupy, které jsou běžné pro výrobu na daném pracovišti.

### 3.11 Měření zkušební obrobku

Pro měření geometrických úchylek a rozměrů zkušební obrobku je běžně v praxi použit souřadnicový stroj. Stroje jsou osazeny dotykovou sondou o vysoké přesnosti, která pro potřeby měření plně dostačuje.

Zhotovený návrh metody měření přesnosti robota je ve spolupráci s firmou MCAE Systems. Pro měření je volen fotometrický systém, kterým je získán 3D model zkušební obrobku a následně porovnáván s výchozím modelem na programování obráběcích drah.

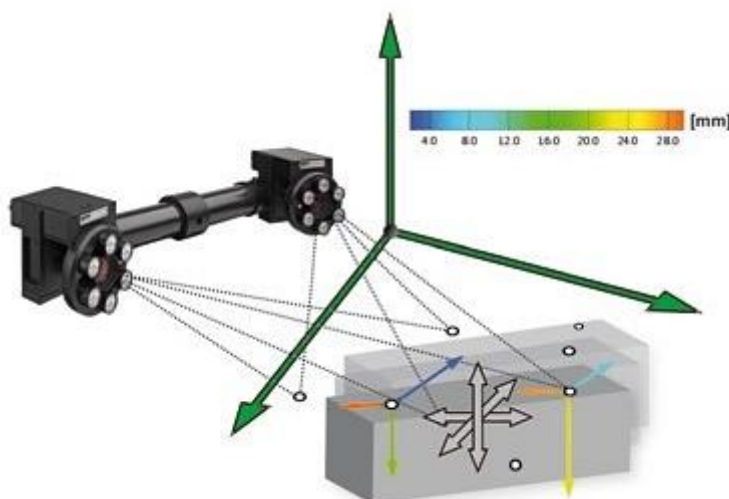
### 3.12 Vyhodnocení naměřených veličin

Hodnocení naměřených úchylek zahrnuje proměření geometrických útvarů na obrobku. Kružnice, roviny, úhly jsou základní prvky pro získání přesnosti výroby.

Je nutné upozornit na problematiku hodnocení přesnosti robota. Metoda obrábění zkušební obrobku je volena pro konvenční obráběcí stroje, kde pro jejich kinematiku lze z naměřených hodnot objasnit příčinu případné nepřesnosti. Kinematika obráběcího robota je zapojena po 6 osách do celkové série. Nelze tak ověřit chyby v jednotlivých osách, pro které je dle platné normy navrhnut zkušební obrobek. Pro obrábění rovinné plochy ve směru os souřadného systému stroje je v součinnosti několik polohovacích prvků robota najednou, mnohdy všech. Z této problematiky lze vyvodit, že nepřesnost od jednotlivých prvků se sčítá a její konečná hodnota je následně ovlivněna velkými rozsahy stroje.

## 4 NÁVRH METODY MĚŘENÍ PŘESNOSTI SYSTÉMEM PONTOS

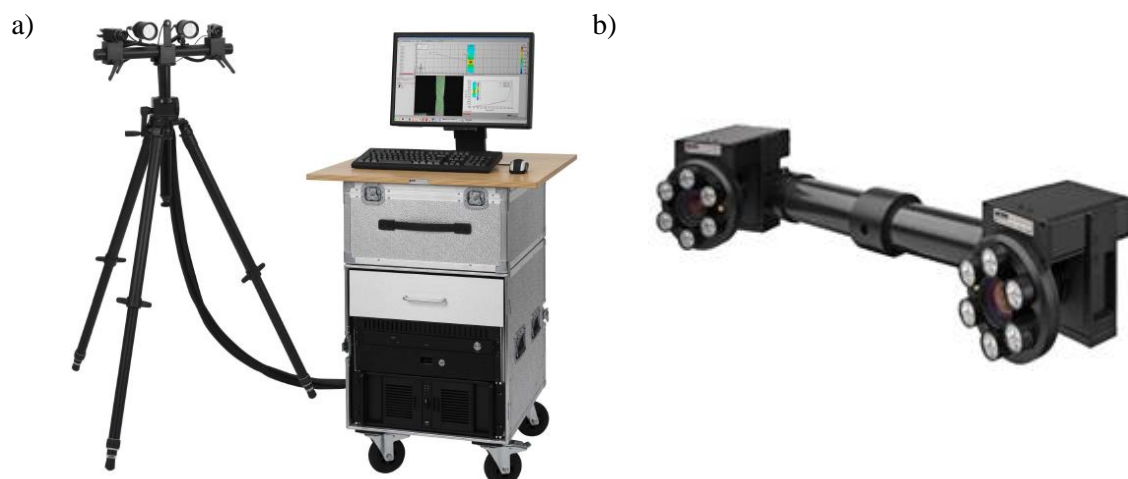
Mezi bezkontaktní metody měření přesnosti robota lze zařadit snímání vysokofrekvenčními kamerami. Optické měřicí metody se využívají pro potřeby statického nebo dynamického měření. MCAE Kuřim disponuje sestavou německého výrobce optických zařízení firmy GOM (Gesellschaft für optische Messtechnik, Braunschweig, 1990). Uvedený systém Pontos je plně k dispozici a slouží pro měření pohybu a deformace.



Obr. 4.1 Princip měření systémem Pontos<sup>32</sup>.

### 4.1 Stručný popis a využití systému Pontos

Pontos je bezkontaktní, optický, 3D měřicí systém, využívající principů stereo fotogrammetrie. Cílem je analýza a vyhodnocení plastické i trvalé deformace měřených těles. Sestava vychází ze softwaru Tritop od německého výrobce společnosti GOM.



Obr. 4.2 Optický systém Pontos<sup>33</sup>, a) sestava, b) vysokofrekvenční kamery.

Dynamická detekce je zaznamenávána vysokofrekvenčními kamerami, které snímají vhodně umístěné referenční body. Software zaznamenanou změnu polohy bodů vypočítá v časové závislosti a porovná souřadnice jednotlivých bodů v prostoru.

#### 4.2 Parametry a základní vlastnosti systému Pontos



Sestava využívá dvou (stereo) kalibrovaných kamer a snímaných bodů, které jsou vhodně umístěny na měřeném objektu.

Hlavní vlastnosti systému Pontos jsou:

- přesnost 0,05 mm při velikosti objektů  $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$ ,
- počet 500 snímků za sekundu pro 1.3 Mpx rozlišení,
- při snížení velikosti snímku až 10 000 snímků za sekundu,
- možnost integrovat externí kamery se zápisem 30 000 snímků za sekundu,
- mobilní zařízení a bezkontaktní metoda.

Reflexní body a vestavěný blesk eliminují problematiku krátkého času uzavěrky. Získané snímky jsou seřazeny do série a lze je využít jako video záznam.

Tab. 4.1 Parametry sestav systému Pontos dostupných na trhu<sup>33</sup>.

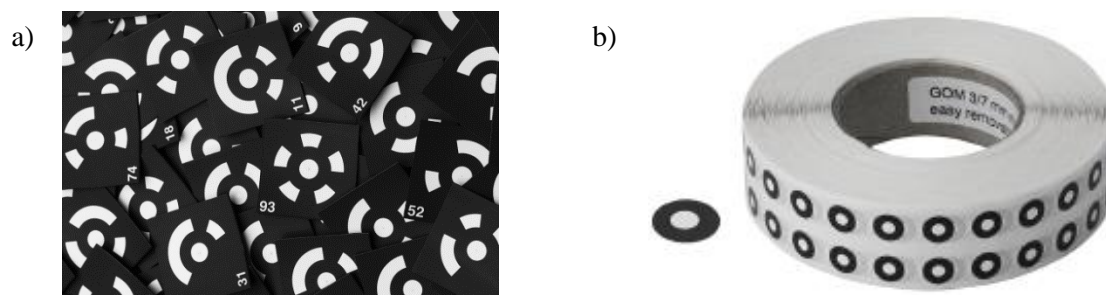
					
	5M	4M	12M	HS	High Speed
Rozlišení kamery [px]	2448 × 2050	2358 × 1728	4096 × 3072	1280 × 1024	1024 × 1024
Snímkovací frekvence	15 Hz (29 Hz)	60 Hz (480 Hz)	24 Hz (367 Hz)	500 Hz (4000 Hz)	5 kHz (1 MHz)
Rozsah teplot [°C]	od -100 do +1500				
Měřicí plocha [m <sup>2</sup> ]	od 0,5×0,4 do 2,5×2				
Rozměry [mm <sup>2</sup> ]	700×200×140				
Hmotnost [kg]	5	7			

Vlastní deformace a posunutí je vyhodnoceno automaticky v off-line režimu. Osvětlení měřeného prostoru LED lampami, dovozuje zvýšit frekvenci záznamu na 500 snímků za sekundu s rozlišením 1,3 Mpx.

### 4.3 Měřicí body

Pro dobrou viditelnost při vysokých rychlostech snímání jsou body opatřeny reflexní úpravou povrchu. Dostatečné nasvětlení měřeného prostoru během otevření uzávěrky zajišťuje diodový blesk. Body jsou připevněny na měřený objekt pomocí samolepící pásky nebo magnetu.

Pro určení bodu v prostoru systém používá kódované a nekódované štítky (viz obr. 4.3).



Obr. 4.3 Měřicí body systému Pontos, a) kódované<sup>33</sup>, b) nekódované<sup>32</sup>.

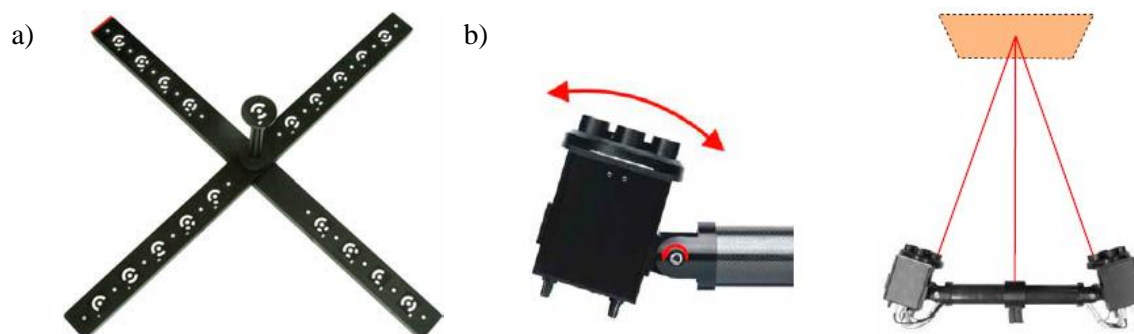
Kódované body (viz obr. 4.3a) systém automaticky detekuje v prostoru pomocí nezaměnitelného označení. Jedná se o binární kódování, které je umístěno podél středícího bodu. Takový měřicí bod je větší a zabírá více prostoru oproti nekódovanému.

Body nekódované jsou menší a snadno vyrobitelné ve velkém množství. Nejčastěji jsou využívány ve formě samolepící pásky jako na obr. 4.3b.

### 4.4 Příprava systému na měření

Během přípravy k měření je nutné předem určit přibližný objem měřeného objektu. Systému Pontos je standardně vybavený 3 tyčemi různých délek (Camera support). Tyče různých roztečí slouží k pevnému spojení kamer. V závislosti na měřeném prostoru a jeho vzdálenosti od kamer je zvolena vhodná tyč, závislost popisují grafy v příloze 5.

Pro určení správné vzdálenosti kamer je nutné nastavit úhel natočení kamer. Pomocí laserového paprsku se ustaví každá kamera do vhodné pozice (viz obr. 4.4b). Cílem je, aby se paprsek pomocného laseru každé kamery protnul s paprskem prostřední tyče.



Obr. 4.4 Kalibrace systému Pontos, a) kalibrační kříž<sup>33</sup>, b) ustavení kamer pomocí laseru<sup>32</sup>.

Následně probíhá zaostření kamer, nastavení clon a kalibrace obou kamer. Pro zajištění správné vnitřní orientace kamer se využívá kalibračního kříže zobrazeného na obr. 4.4a. Proces je automatizovaný a snímá se určitý počet kalibračních bodů umístěných na nosném kříži, který je smontován ze dvou nosníků.



#### 4.5 Zkušební podmínky

Měření přesnosti robotů je upřesněno normou ISO 9283. Výsledky a naměřené hodnoty jsou poté porovnatelné mezi výrobci, kteří pod uvedenou normou prezentují technické vlastnosti produktů. Pro měření je vhodné dodržet uvedené zkušební podmínky.

Upevnění robota je dle souladu doporučení výrobce. Nedostatečná stabilizace má negativní vliv na průběh měření a jeho výsledek. Robot je kompletně osazený a smontovaný. Doporučuje se ověřit plnou funkčnost a provést kalibrační a seřizovací proces. Při seřizování pomocí Kuka EMT se řídícím systémem robota, automaticky najede seřizovací poloha. Nejdříve se seřizuje bez zátěže, poté se zátěží.

a)



b)



Obr. 4.5 Seřízení robota pomocí a) elektrický měřicí dotyk Kuka EMT, b) měřicí hodiny.

Při seřízení pomocí měřicích hodin uživatel manuálně najede seřizovací polohu. Seřizuje se vždy se zátěží. Není možné uložit několik seřízení pro různé zátěže. Specifika výrobce mohou doporučovat zahřívací proces, který předchází vlastní měření. Norma zahřátí nepřikazuje, ale pro jednoznačnost měření je vhodné problematiku neopomenout. Pracovní podmínky musí být dodrženy dle předpisu výrobce a zahrnují teplotu, vlhkost, elektromagnetické pole, nečistoty, nadmořskou výšku. Nevhodné je také kolísání elektrické energie, pneumatického a hydraulického tlaku. Okolní teplotu je doporučeno udržovat kolem 20 °C. Jiné hodnoty musí být uvedeny v protokolu měření. Stálost teploty je vhodné během měření kontrolovat a nesmí přesáhnout toleranci  $\pm 2$  °C.

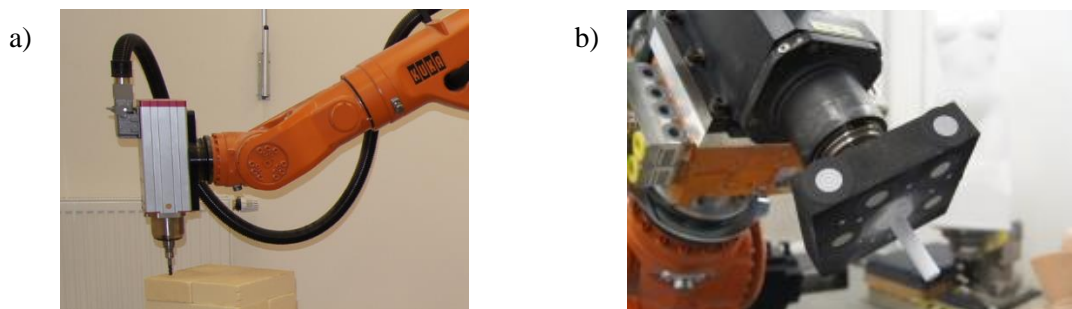
#### 4.6 Návrh koncového efektoru pro kalibrované body

Při měření přesnosti robota dle normy ČSN EN ISO 9283 je postupováno bez zátěže a se snímáním bodu v těsné blízkosti koncového efektoru. Popisovaný návrh metody zohledňuje problematiku jednoduché a dostupné proveditelnosti. Z praktických důvodů je velmi obtížné umístit body na přírubu robota, neboť je nutné demontovat adaptér s vřetenem. Jedná se o časově náročný proces a následnému uvedení do provozu předchází kalibrace. Často je také nutné demontovat přívodní kabeláž ke vřetenu. Z uvedených důvodů je přesnost robota měřena na vřeteni s vhodným návrhem koncového efektoru osazeného kalibrovanými body.

Systém Pontos snímá kalibrované body, které jsou unášeny na měřeném těle robota. Je vhodné volit neoptimálnější umístění těchto bodů, které musí být dobře čitelné ve všech měřených polohách. Pro potřeby zadavatele je správný výběr místa pro kalibrované body navrhnout s ohledem na optimalizaci měření, dle jeho představ. Upravené rozmístění se poté připevní na pozice jednotlivých částí konstrukce nebo celé sestavy. Příklad měření přesnosti obráběcího robota, vyžaduje umístění kalibrovaných bodů nejblíže k místu mezi robotem a koncovým efektozem.



Koncový efektor představuje jednotku pro vykonávání požadované práce. Například uchopení dílu, obrábění materiálu nebo jiné technologické přípravy, které jsou připojeny k zařízení dovolující měnit jeho polohu. Diplomová práce popisuje roboty vybavené obráběcím vřetenem. Konkrétní příklad je uveden na obr. 4.6, kde sestava obsahuje, kromě robota také adaptér a vřeteno.



Obr. 4.6 Koncový efektor a) obráběcí vřeteno, b) navržený koncový adaptér.

#### 4.6.1 Mechanicky deformovatelný upínač

Mechanický deformovatelný upínač pracuje v oblasti pružné deformace, při které nedochází k žádným mechanickým změnám v materiálu a počet cyklů je možno opakovat bez omezení. Systém Tribos je flexibilní a mezi hlavní výhody patří přesné upnutí nástroje ( $\leq 0,003$  mm), štíhlá konstrukce, tlumení vibrací, rychlá a jednoduchá výměna nástroje bez nutnosti ochlazování.

Měřené body lze nalepit na prodloužení uvedeného polygonálního upínače. Body jsou od sebe rozmístěny nestejnoměrně pro jednoduchou detekci měřícím systémem. Výroba přípravku je velmi snadná a časově nenáročná.

Postup zahrnuje očištění držáku Tribos a nanesení kalibrovaných bodů. Je nutné dodržet již uvedenou různorodost roztečí mezi jednotlivými body. Při podobnosti těchto vzdáleností hrozí, že výpočetní software zamění jednotlivé body mezi sebou a nebude schopen vypočítat souřadnice zvoleného přípravku v prostoru.



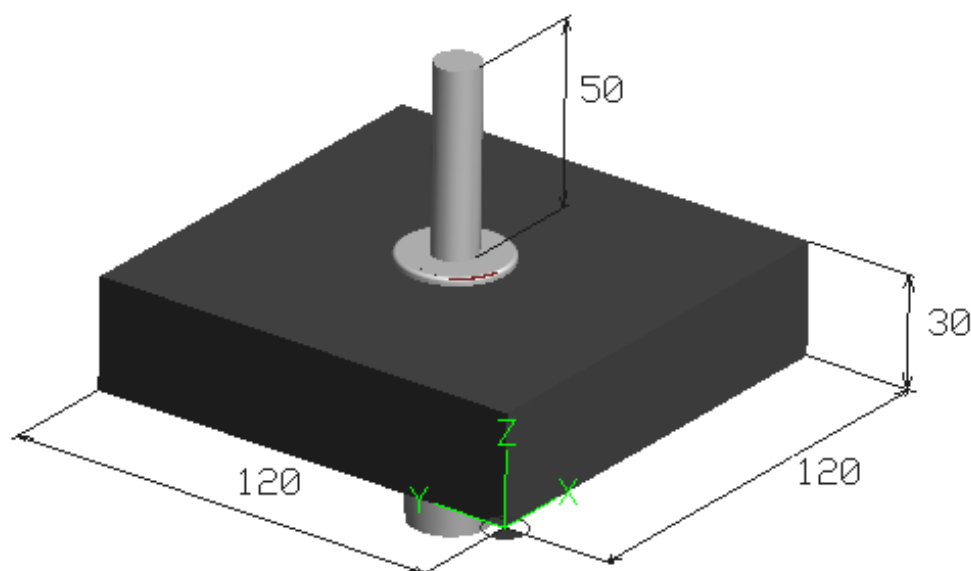
Obr. 4.7 Kalibrační body umístěny na polygonálním upínači Tribos.

Velkou předností uvedeného návrhu je jednoduchost při nalepení referenčních bodů na deformovatelný upínač, kde stačí vhodné rozmístění bodů. Bohužel následují pouze nevýhody. Na štíhlý držák Tribos nelze nalepit velké reflexní body. Body musí být voleny malé a následně jsou hůře čitelné a negativně ovlivňují výslednou přesnost měření.

Pro zaměření adaptéru a výpočet souřadnic je potřeba tří bodů v dobré kvalitě zaostření. Tento přípravek nezaručuje správné zaostření bodů a není pro potřeby měření vhodný.

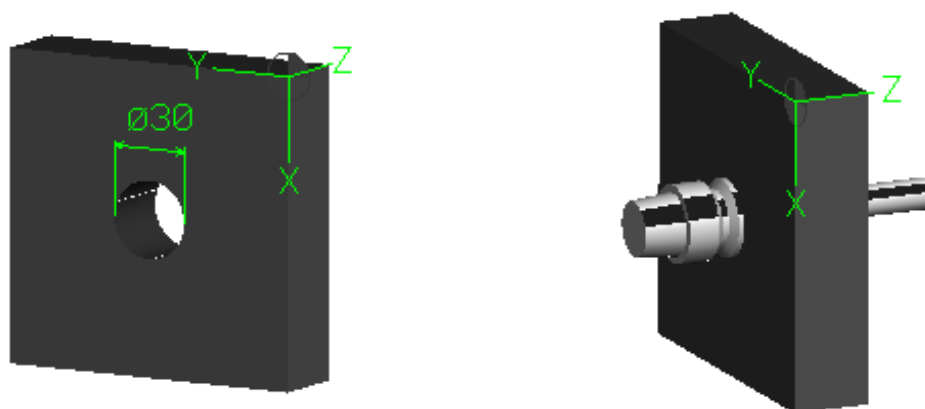
#### 4.6.2 Mechanický upínač s nosnou plochou

Cílem je odstranit negativní vlastnosti, které jsou uvedeny u prvního návrhu 3.4.1. Mechanicky deformovatelný upínač. Zde je připomenuta malá plocha pro umístění bodů a její nevhodný tvar. Problematiku lze vyřešit vhodným nástavcem opatřeným rovnou plochou, na kterou se snadno nalepí kalibrované body. Obrázek. 4.8 zobrazuje návrh koncového adaptéru pro měření.



Obr. 4.8 Mechanický upínač s nosným prvkem a nalepenými body.

Návrh se skládá z mechanicky deformovaného upínače Tribos, nosného prvku a snímaného dříku. Detailně je koncový adaptér zobrazen na obrázku 4.9.

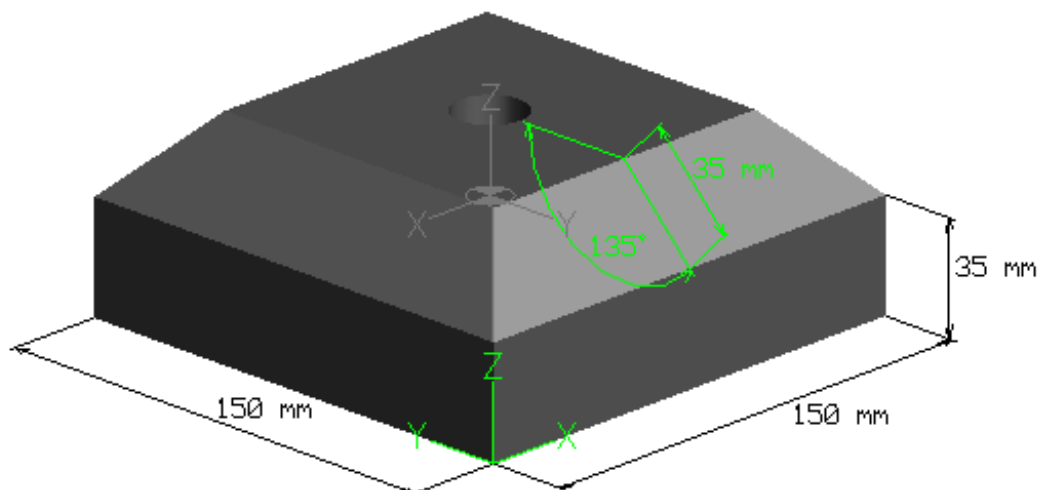


Obr. 4.9 Mechanický upínač s nosným prvkem detailní pohled.

Rozměry přípravku jsou voleny pro snadné rozložení bodů a jednoduchou výrobu z dostupného polotovaru. Zaměřovací dřík se jako první upevní do polygonálního upínače Tribos. Následně je vyroben nosný prvek a pro lepší kontrast nastříkán černou barvou. Spojení obou dílů je mechanické s přesahem. Je nevhodné v průběhu příprav a měření dodržet pevné spojení obou dílů. Vlastní měření snímá nalepené body a jejich vychýlení vůči celé sestavě je nežádoucí.

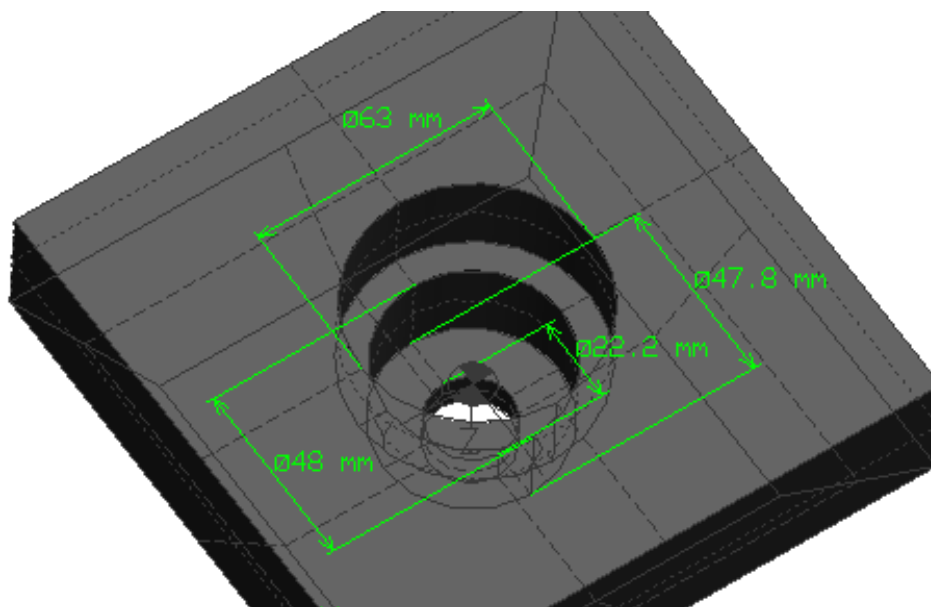
#### 4.6.3 Mechanický upínač a nosný prvek se sražením

Optimalizací mechanického upínače s nosným prvkem vznikl třetí návrh koncového ejektoru. Dráhy jsou snímány pomocí adaptéru umístěného v nakloněném vřetenu robota. Při použití rovné nosné plochy jsou body snímány pod úhlem, který snižuje ostrost zaznamenaných snímků kamerami.



Obr. 4.10 Návrh adaptéru v softwaru Tebis.

Adaptér byl navrhnut pro měření robota KR 120 HA, který v době provozu byl osazen jiným vřetenem. Z tohoto důvodu je navržen nový koncový adaptér. Získané zkušenosti po prvním měření jsou využity při optimalizaci nového návrhu viz. obr. 4.10.



Obr. 4.11 Detail otvorů pro nalisování držáku.

První návrh s rovnou plochou dostačoval pro potřeby našeho měření, ale drobné úpravy na tvaru a fiktivního středového bodu poskytují lepší přesnost, čitelnost a efektivitu během měření.

#### 4.7 Měření koncového adaptéru

Přesnému výpočtu měřených drah předchází získání digitálního modelu navrhnutého adaptéru. Nejedná se o plošný nebo objemový model. Jsou získána skutečná funkční data, potřebná k výpočtu. Především je přesně definován měřený bod na adaptéru, který lze zvolit i v prostoru a určit co nejpřesněji jeho polohu vůči snímaným, kalibrovaným bodům.



Obr. 4.12 Fotoaparát systému Tritop firmy Gom mbH.

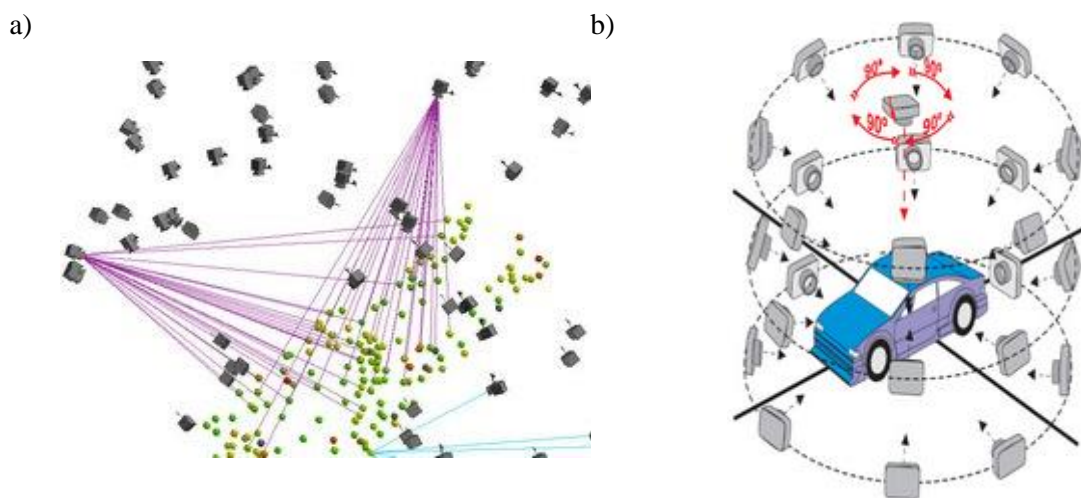
Měřený bod je volen s ohledem na snadné určení a programování drah. Dráhy jsou naprogramovány s výškovou korekcí k uváděnému bodu a následně je celková výška adaptéru změřena a zadána do řídicího systému robota, který provede konverzi drah vůči zadané korekci. Z uvedeného postupu vyplývá důležitost vhodného návrhu adaptéru a jeho konečného bodu s ohledem na snadnost měření jeho délky.

Tento postup je velmi přesný a limituje nepřesnost vzniklé během výroby adaptéru. Po měření je s koncovým efektem manipulováno jemně a opatrně. Spadnutí a nešetrné zacházení může změnit vzdálenosti mezi kalibrovanými body a měřeným počátkem.

Sestava Tritop firmy Gom mbH zobrazena na obrázku 4.12 je velmi přesná a pracuje na optické metodě. Jeho výhodou je snadná manipulovatelnost a přenosnost až 20  $\mu\text{m}$ .

Samotná přesnost měření systémem Tritop se odvíjí od vnějších podmínek. Zásadní je teplota prostředí, fotoaparátu a vlastní měřené součásti. Světelné podmínky a velikost objektu mají také velký vliv na konečnou přesnost. Při použití této metody u velkých dílů se musí počítat s rostoucí odchylkou, kde se chyby z jednotlivých snímků sčítají a zahrnují do celkového výsledku.

Měření běžně využívá kalibrační tyče, které slouží pro stanovení měřítka. Jedná se o nosný prvek s kalibrační délkou vůči teplotě. Bývá osazený na jeho koncích kódovanými body.



Obr. 4.13 Systém Tritop<sup>34</sup> a) vyhodnocení snímku, b) postup snímání objektu.

Software Tritop Professional firmy Gom mbH je vybaven různými nástroji pro práci s naměřenými daty. Často je použit pro měření výrobku a jejich bližší analýze.

Program vyhodnocuje pozice bodů, vektorů, vzdáleností, průměrů, úhlů, nastavené tolerance a další funkce. Je umožněno prokládat body plochami, křivkami a entitami.

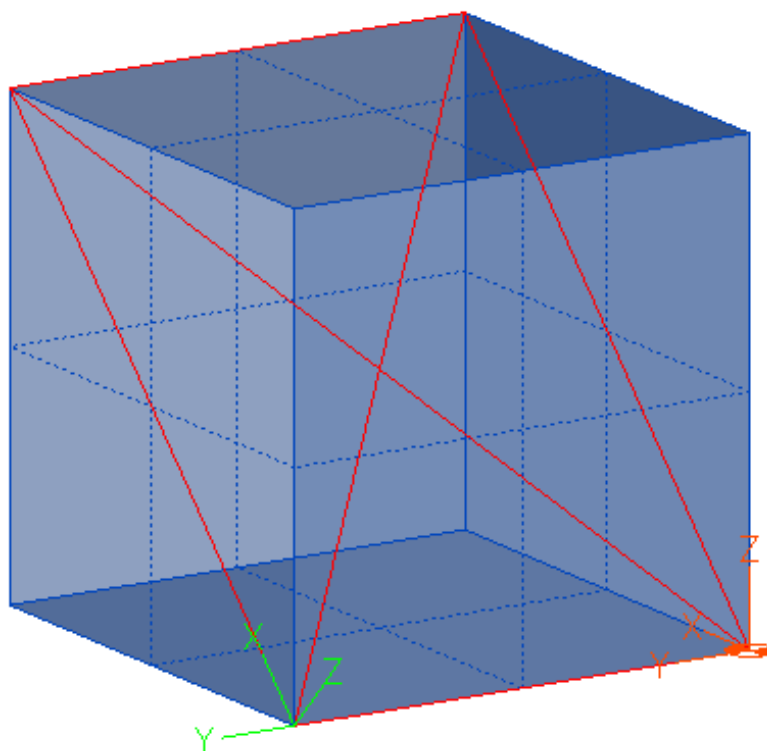


Obr. 4.14 DMG Microset VIO 20/50 Linear.

K dispozici je také měřicí systém DMG Microset VIO 20/50 Linear (viz. obr. 4.14), který je pro měření koncového adaptéru použit. V praktické části je na zařízení měřena výšková korekce u prvního adaptéru. Druhý adaptér je po optimalizaci měřen pouze snímkováním s následným vyhodnocením v programu Tritop Profesional.

#### 4.8 Určení měřeného prostoru

Měření probíhá v prostoru definované tvarem krychle (viz. obr. 4.15). Pro potřeby zkoušky je použita jedna krychle a je vhodně umístěna v části pracovního prostoru, kde je předpoklad nejčastějšího využití obráběcího robota. Velikost stran je volena co největší a její hrany jsou rovnoběžné se souřadnicovým systémem základny.



Obr. 4.15 Pracovní prostor určený stěnami krychle.

V uvedené krychli lze navolit jednu libovolnou měřicí rovinu, která se do výsledku měření musí uvést. Na obrázku 4.15 zvolená rovina, která je znázorněna červenou barvou, není střežná a je možno volit ze čtyř směrů jednotlivých úhlopříček.

Rozměry krychle jsou voleny dle rozsahu, měření a dosahu robota. Norma uvádí délky stran 250 mm, 400 mm, 630 mm a 1000 mm<sup>35</sup>.

#### 4.9 Zkušební rychlost

Parametry polohy musí být zkoušeny při maximální rychlosti 100 %. Doplnkové měření může být provedeno při posuvech snížených na 50 % a 10 %<sup>35</sup>.

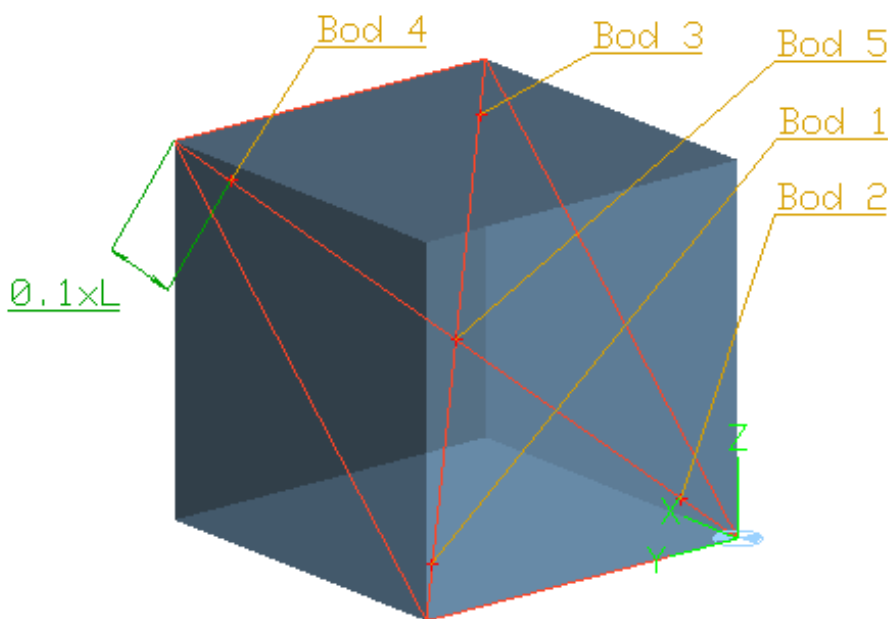
Při měření parametru dráhy, je pro každou zkoušenou trajektorii volena 100%, 50% a 10% posuvová rychlost. Použitý rozsah má být uveden ve výsledcích měření a volba se odvíjí v závislosti na tvaru a délce dráhy. Robot této rychlosti dosáhne v minimálně 50 % délky měřené trajektorie. Setrvačnost obráběného vřetena může negativně ovlivňovat výslednou přesnost měření, zejména při vyšší posuvové rychlosti. Zkoušky se zátěží jsou normovány a zátěž se uvádí do výsledků měření<sup>35</sup>.



#### 4.10 Definice parametru polohy

Norma ČSN EN ISO 9283 popisuje rozmístění pěti vhodných poloh v rovině umístěné uvnitř krychle v oblasti pracovního prostoru. Body jsou umístěny v měřicí rovině a jsou popsány Bod 1, Bod 2, Bod 3, Bod 4 a Bod 5.

Středový Bod 5 je průsečíkem úhlopříček a středem krychle. Ostatní body jsou od jednotlivých konců úhlopříček umístěny ve vzdálenosti 10 % její délky (viz. obr. 4.16.) V případě nedodržení této podmínky je použit nejbližší bod na úhlopříčce<sup>35</sup>.



Obr. 4.16 Měřené body parametru polohy.

Robot svojí pozici najíždí na Bod 5 a pokračuje přes Bod 1 až na počáteční Bod 5. Pohyb mezi jednotlivými pozicemi je jednosměrný a dle zadaných rychlostí. Měření probíhá až po dosažení koncového adaptéru koncové pozice. Nájezdová pozice pro Bod 1 je neměřena, v schématickém postupu (viz. tabulka 4.2) je tento bod zobrazen kurzívou<sup>35</sup>.

Tab. 4.2 Zvolená rychlost posuvu a postup měření parametru polohy<sup>35</sup>.

Rychlost posuvu [mm/min]	1600	630	10
Postup [-]	<div><div>Bod 5</div><div>➡</div><div>Bod 1</div><div>➡</div><div>Bod 2</div><div>➡</div><div>Bod 3</div><div>➡</div><div>Bod 4</div><div>➡</div><div>Bod 5</div></div>		

Pro každou polohu je naměřena jednosměrná přesnost polohy dle postupu v tabulce 4.2. Setrvání koncového adaptéru na jednotlivých bodech je nezbytné po dobu konečného zaměření polohy. Pro tento účel je nutné upravit program, nebo postup zadávání jednotlivých příkazů do robota.

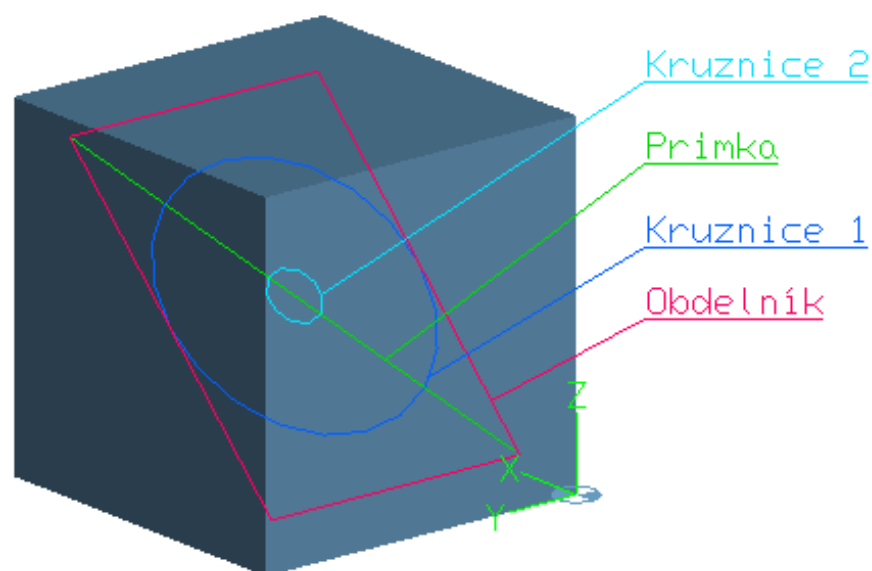
#### 4.11 Definice parametru dráhy

Zkušební dráhy jsou podrobněji uvedeny v normě ČSN EN ISO 9283. V kapitole 3.5 je popsána krychle pracovního prostoru, která je výchozím prvkem ke správným návrhům.

Tab. 4.3 Zvolená posuvová rychlost dle ČSN EN ISO 9283<sup>35</sup>.

Rychlost posuvu [mm/min]	96000 (maximální)	15000	600
-----------------------------	----------------------	-------	-----

Zkušební dráhy jsou umístěny na zvolené pracovní rovině ležící uvnitř krychle, jako na obr. 4.17. V podkapitolách popsané tvary křivek jsou navrženy s odkazem na normu ČSN EN ISO 9283, ale pro specifické požadavky lze měřené prvky přizpůsobit představám zadavatele měření. Rychlost posuvu je uvedena v tabulce 4.3<sup>35</sup>.



Obr. 4.17 Zkušební dráhy dle ČSN EN ISO 9283<sup>35</sup>.

##### 4.11.1 Přímka

Na obrázku 4.17 je znázorněna zelenou barvou zkušební dráha ve tvaru přímky. Přímka je umístěna v úhlopříčce zvolené pracovní krychle. Měřená délka je 80% vzdálenosti koncových bodů na úhlopříčce<sup>35</sup>.

##### 4.11.2 Kružnice 1

Zkouška kružnice je měřena na dvou průměrech. Kružnice 1 je polohována do středu pracovní roviny se středem v průsečíku úhlopříček. Průměr kružnice je 80% délky strany krychle a na obrázku 4.17 je zobrazena tmavě modrou barvou<sup>35</sup>.

##### 4.11.3 Kružnice 2

Malá kružnice 2 je definována stejně jako větší kružnice popsaná v předchozí kapitole 3.7.2. Liší se pouze poloměrem, který odpovídá 10% průměru velké kružnice<sup>35</sup>.

##### 4.11.4 Obdélník

Jednotlivé rohy obdélníkové dráhy jsou vzdáleny od rohu pracovního kváдру o 10% délky úhlopříček. Na obr. 4.16 je názorně okótován Bod 4, který se nachází ve stejné poloze<sup>35</sup>.

## 5 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ METODY MĚŘENÍ PŘESNOSTI VÝROBOU ZKUŠEBNÍHO OBROBKU



V kapitole 3 jsou popsány dvě metody měření přesnosti obráběcích robotů. Praktické měření má za cíl ověření funkčnosti navržených metod v praxi. Text je formulován s posloupností jednotlivých kroků, které směřují k cíleně naměřeným hodnotám.

### 5.1 Popis měřeného robota

Pro praktické zkoušení metod je k dispozici robot KR 60 HA od výrobce KUKA ROBOTER GMBH. Robot je vybaven vřetenem a od roku 2009 umístěný na obráběcím pracovišti firmy MCAE Systems.

Druhý robot výrobce Kuka je označen KR 120 R2700 extra HA a byl zapůjčen pro testování a názornou ukázkou obrábění robotem. Během měření byl umístěn na stejném pracovišti jako KR60 ve firmě MCAE Systems. Základní technická data jsou vedeny v tabulce 5.1 pod textem.

Tab. 5.1 Technická data zkoušených robotů<sup>36, 37</sup>.

		
Robot	Kuka KR 60 HA <sup>36</sup>	KR 120 R2700 extra HA <sup>37</sup>
Mezní zátěž [kg]	60	120
Přídavná zátěž [kg]	35	50
Maximální pracovní dosah [mm]	2033	2696
Přesnost opakování [mm]	±0,05	±0,05
Dráhová přesnost opakování [mm]	±0,16 (ISO 9283)	-
Hmotnost [kg]	665	1104
Řídicí systém [-]	KR C2	KR C4

## 5.2 Obráběcí pracoviště

Firma MCAE v Kuřimi je vybavena obráběcím pracovištěm od roku 2009. Po modernizaci budovy bylo pracoviště přemístěno do nově vzniklé přístavby v roce 2014. Prostory jsou navrhnuty s ohledem na budoucí instalaci nového obráběcího robota s lineárním posuvem, který rozšíří možnosti uplatnění této technologie.



Obr. 5.2 Obráběcí pracoviště firmy MCAE Systems.

Pracoviště je vybaveno obráběcím robotem a pracovním stolem. K dispozici je polohovací jednotka po pravém boku robota viz. obr. 5.2. Pracovní prostor je ohraničen bezpečnostní stěnou, chránící proti odletujícím částí z místa řezu a případným následkům nežádoucí kolize. Řídicí panel je umístěn v bezpečnostní části za ohrazením a lze ho zavěsit do držáku u vstupních dveří, s bezpečnostním zámekem.

Při obrábění neželezných materiálů velkých rozměrů, je doprovázeno vznikem velkého objemu třísek a odřezků. Proto je pracoviště vybaveno odsávací jednotkou s filtrací a zásobníky na objemné pytle. Odsávací jednotka je na obrázku 5.2 umístěna na levé straně pracoviště.

Obráběcí robot je vybaven řídicím systémem a ovládáním vřetena. Vše je uloženo v pracovních skříních v těsné blízkosti robota. V případě obráběcího pracoviště firmy MCAE Systems jsou uloženy ve vedlejší místnosti v bezpečnostní zóně, kde jsou chráněny před vlivy pracovního prostředí. Obrábění neželezných materiálu doprovází vysoká prašnost, která není pro elektronické řídicí prvky žádoucí.

### 5.2.1 Obráběný materiál

Pro potřeby měření přesnosti robota je k dispozici materiál SikaBlock M330. Jedná se poměrně o lehký materiál s nízkou hustotou a dobrou obrobiteľností. Opracovávání bloku lze řezáním, frézováním nebo vrtáním případně strojním nebo ručním způsobem.

Použití materiálu SikaBlock M330<sup>31</sup>:

- výroba modelů pro design, styling modely,
- výroba nebo základ pro cubing a data kontrol modely,
- jednoduché formy na laminování.

Materiál je obecně uváděn pod označením PUR nebo polyuretan. Smícháním složek polyonu a isokyanátu vzniká makromolekulární pěna. Tvarová a rozměrová stálost při malé hustotě je zajištěna velkým množstvím ucelených buněk, které jsou odolné vůči vlivům okolí a zajišťují dobré izolační vlastnosti. Mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 5.2.

Vlastnosti materiálu SikaBlock M330<sup>31</sup>:

- velmi jemný, hustý povrch,
- snadno se opracovává,
- nízká tvorba prachu při obrábění,
- velké rozměry.

Materiál je dodán ve formě rozměrných kvádrů. Cíleně byl návrh zkušebního obrobku volen s ohledem na rozměry polotovaru. Ušetřený čas za programování a hrubování polotovaru je přínosný a obrobek má prostor pro testování.

Tab. 5.2 Fyzikální a mechanické vlastnosti materiálu SikaBlock M330<sup>31</sup>.

Veličina	Hodnoty	Jednotky	Norma
Hustota	24	kg/m <sup>3</sup>	ISO 845
Tvrdost	D 25	-	ISO 868
Pevnost v ohybu	5	MPa	ISO 178
E-modul	150	MPa	ISO 178
Pevnost v tlaku	4	MPa	ISO 844
Tepelná odolnosti	55-60	°C	ISO 75 B
Koeficient lineární tepelné roztažnosti $\alpha_T$	$65 \cdot 10^{-6}$	K <sup>-1</sup>	DIN 53 752

### 5.3 Měření nástrojů pro obrábění

Použité nástroje jsou měřeny na optickém zařízení DMG MORI tool presetting, který dosahuje přesnosti 0,002 mm. Obrábění je programováno na vybraný souřadný systém umístěný na vřetenu zkoušeného robota. Celkové vyložení nástroje je nutné proměřit. Délková korekce je zapsána do programu KUKA.CAMRob PC, který přepočítá měřené obráběcí dráhy.

#### 5.3.1 Najížděcí hrot

Nejedná se o obráběcí nástroj, ale o přípravek ve tvaru hrotu upnutého do držáku, celý nástroj je zobrazen na obrázku 4.7 v kapitole 4.6.1 Měření probíhá na robotu, kde se špička nástroje polohuje do jednoho bodu ze čtyř směrů. Výšková korekce je 92,349 mm.

#### 5.3.2 Stopková fréza D18

Fréza je určena pro hrubování a není nutné uvádět její přesné rozměry. Přesto byla změřena a pro výpočet drah je převzat její největší průměr, který je 18,076 mm.

#### 5.3.3 Stopková fréza D10

Dokončovací nástroj, který ovlivňuje výsledky měření. Fréza je pečlivě proměřena na zařízení DMG tool presetting a tabulka 5.3 uvádí rozměry každého zubu.

Tab. 5.3 Naměřené rozměry stopkové frézy D10.

Břit nástroje	1	2	3	4
Poloměr [mm]	9,035	9,027	9,023	9,038
Délková korekce [mm]	110,957	110,952	110,976	110,956

#### 5.3.4 Toroidní fréza D52

Fréza je použita při měření čelního frézování. Pro minimalizování nepřesnosti měření je změřen každý ze čtyř pracovních břitů. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.4 pro každou vyměnitelnou destičku zvlášť.

Tab. 5.4 Naměřené rozměry toroidní frézy.

Břit nástroje	1	2	3	4
Poloměr destiček [mm]	4,972	4,982	4,998	4,990
Délková korekce [mm]	119,965	119,968	119,955	119,960

### 5.4 Tvorba NC programu Tebis

Dráhy pro výrobu zkušebního obrobku jsou vypočteny v CAD/CAM softwaru Tebis. Následující kapitoly popisují základní nastavení použitých programů při jeho obrábění. Získané dráhy je nutno ještě převést na vhodný formát pro obráběcího robota. V praktické části je k tomu použit software KUKA.CAMRob a modul Tebis Roboter.

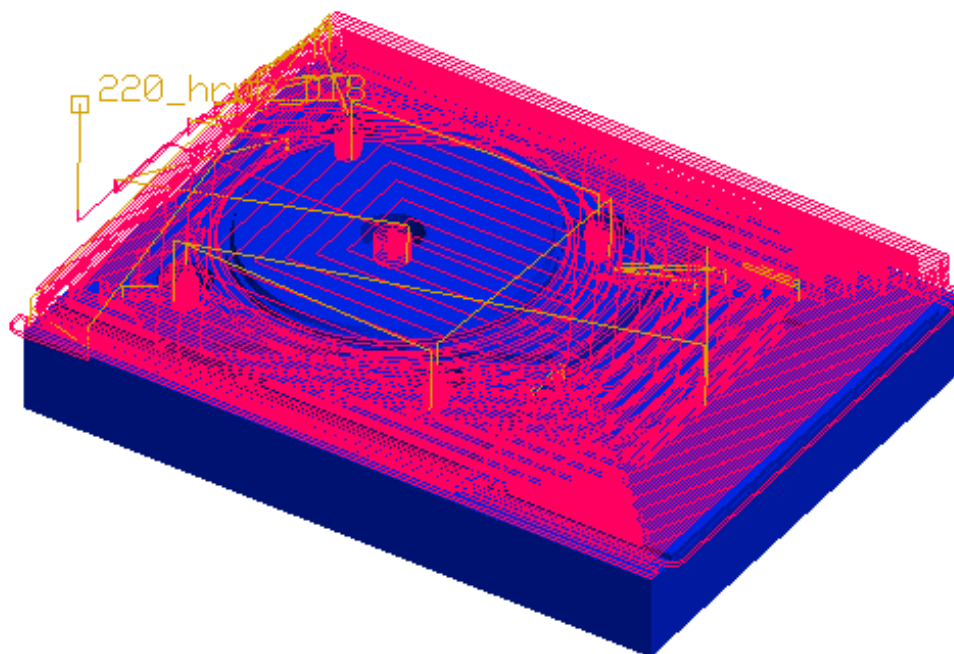


### 5.4.1 Hrubování D18

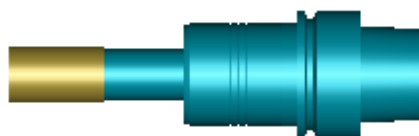
Generování programu v CAM modulu předchází modelování zkušební polotovaru v CAD aplikaci v software Tebis. Zkušební obrobek je podrobně popsán v kapitole 3.1.4 a slouží pro vygenerování obráběcí dráhy. Pro hrubování polotovaru je volena stopková fréza o průměru 18 mm. Tabulka 5.5 popisuje trajektorie nástroje při hrubování a základní nastavení obrábění.

Tab. 5.5 Hrubování stopkovou frézou D18.

Dráhy nástroje generované v Tebisu 3.5 R8



Nástrojová sestava



Přísuv [mm]	15
Hloubka řezu [mm]	3
Cyklus obrábění [-]	sousledné
Řezná rychlost [m/min]	400
Otáčky [1/min]	7000
Posuvová rychlost [mm/min]	2800

**tebis**  
THE CAD/CAM EXPERTS

**MCAE**

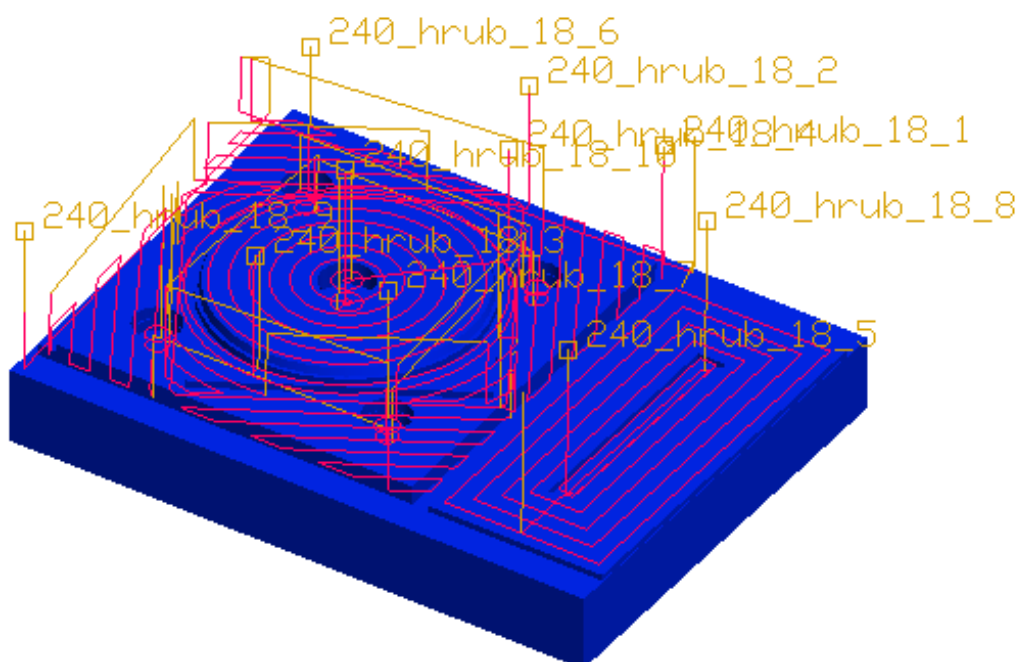
Pomocí tříosé strategie RPlane a modelu polotovaru je vypočten hrubovací program. Přídavek pro dokončování je zvolen 1mm. Zkušební obrobek obsahuje otvory, které nejsou vrtány. Vše je obrobeno stopkovou frézou a pro snížení rázového namáhání je použita funkce rampového zanořování. Úhel zapouštění je nastaven na 2° a bezpečnost na délku 10 mm. Přesnost drah pro hrubování není nutná a chyba tětiny 0,03 mm je dostatečná.

### 5.4.2 Dokončování D18

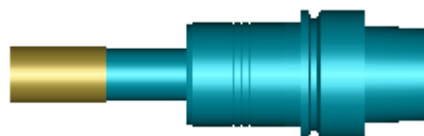
V hrubovacím programu je obráběno s přídavkem 1mm na všech plochách. Pro potřeby měření jsou pouze boční plochy rovin a zahlbění. Druhou operací jsou stejným nástrojem dokončeny roviny, které nevyžadují přídavek pro další obrábění. Tabulka 5.6 popisuje trajektorie nástroje při dokončování a základní nastavení obrábění.

Tab. 5.6 Dokončování stopkovou frézou D18.

Dráhy nástroje generované v Tebisu 3.5 R8



Nástrojová sestava



Přísuv [mm]	15
Hloubka řezu [mm]	1
Cyklus obrábění [-]	sousledné
Řezná rychlost [m/min]	300
Otáčky [1/min]	5300
Posuvová rychlost [mm/min]	2120

**tebis**  
THE CAD/CAM EXPERTS

**MCAE**

Programování rovinných ploch je pomocí dvouosé funkce MPlan s výběrem strategie paralelně s obrysem. Přejezd nástroje je volen na 20 % jeho průměru. Bezpečnost polohování je nastavena na 50 mm a výjezdy a nájezdy o hodnotu 200 mm vůči počátku.

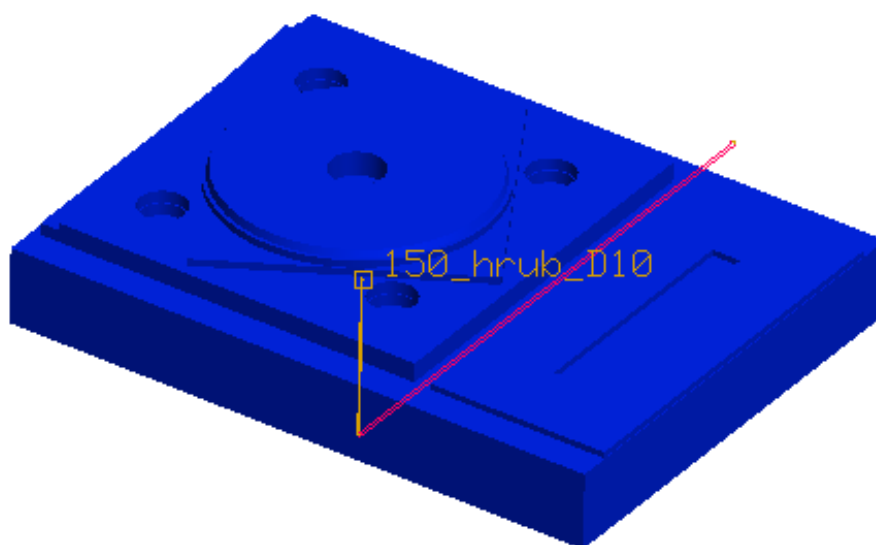
Otvory jsou dokončeny po boku MCont strategie Z konstantně. Pro dokončovací obrábění je u všech drah volena chyba tětiny 0,001 mm

### 5.4.3 Hrubování D10

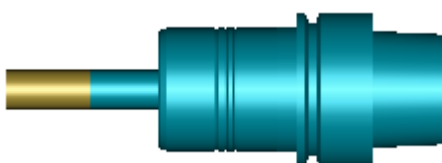
Rozměry polotovaru jsou efektivně zvoleny a z tohoto důvodu je vzdálenost mezi hlavním tvarem a plochou pro zkoušení nutné hrubovat menší frézou. Pro usnadnění a zrychlení přípravy obrábění je zvolena stopková fréza D10, která nachází hlavní uplatnění v dokončovacích operacích naměřených tvarech. Tabulka 5.7 popisuje trajektorie nástroje při hrubování a základní nastavení obrábění.

Tab. 5.7 Hrubování stopkovou frézou D10.

Dráhy nástroje generované v Tebisu 3.5 R8



Nástrojová sestava



Přísuv [mm]	10
Hloubka řezu [mm]	16
Cyklus obrábění [-]	sousledné
Řzná rychlost [m/min]	400
Otáčky [1/min]	12000
Posuvová rychlost [mm/min]	4800

**tebis**  
THE CAD/CAM EXPERTS

**MCAE**

Uvedená operace není stěžejní a pro zkoušky přesnosti ji nelze opomenout. Neobrobená oblast je spojena s měřenou rovinou a pro následné dokončování je nežádoucí. Následně je dokončování plochy obrobena nástrojem v plném záběru jeho průměru a s maximální hloubkou řezu 16 mm. Popsané řzné podmínky nejsou objektivní vůči ostatním měřeným plochám a je vhodné zbytkový materiál obrobit.

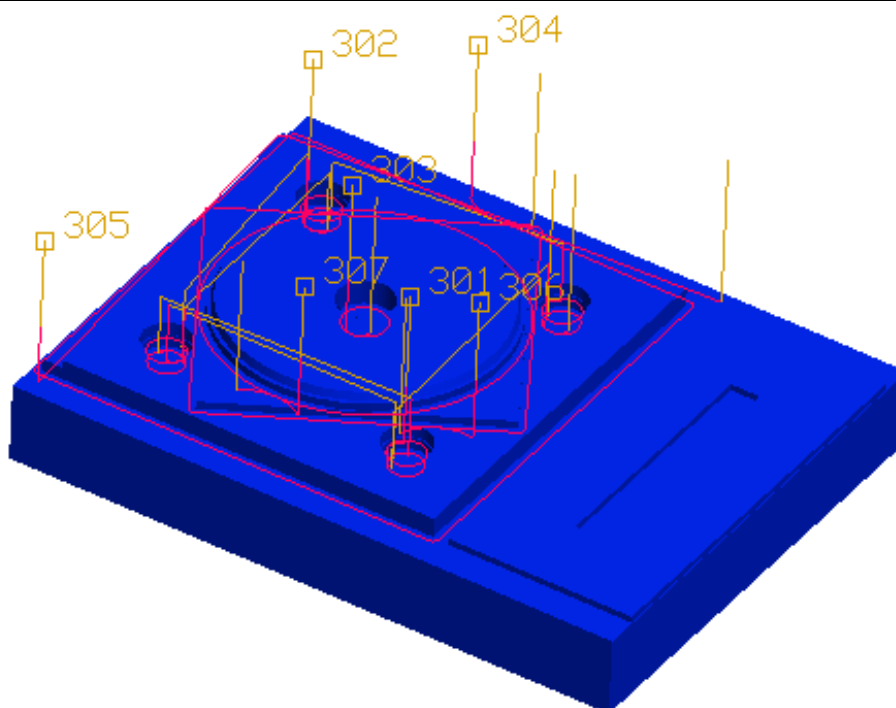
Pro generování programu je volena tříosá strategie MCont s obráběním Z konstantně. Přejezd nástroje je volen na 50 % jeho průměru a pro dostatečný výjezd z polotovaru je přiřazeno makro s prodloužením 10 mm.

#### 5.4.4 Dokončování D10

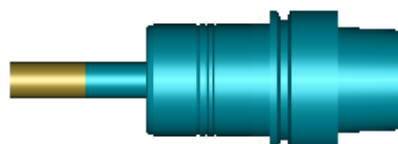
Dokončování měřených prvků je nejdůležitějším obráběním na zkušebním obrobku. Je vybrána stopková fréza, která je použita u předešlé operace. Dokončovací dráhy (viz tab. 5.8) je nutné přepočítat v závislosti na počtu měření pro konkrétní obrobek. V případě této práce je měřený prvek na zkušebním obrobku obráběn čtyřikrát. To vyžaduje pro každé měření nový výpočet drah na zmenšené rozměry ploch. Tabulka 5.8 popisuje trajektorie nástroje při dokončování a základní nastavení obrábění.

Tab. 5.8 Dokončování stopkovou frézou D10.

Dráhy nástroje generované v Tebisu 3.5 R8



Nástrojová sestava



Přísuv [mm]	1
Hloubka řezu [mm]	max. 20
Cyklus obrábění [-]	sousledné
Řezná rychlost [m/min]	300
Otáčky [1/min]	9500
Posuvová rychlost [mm/min]	3800

**tebis**  
THE CAD/CAM EXPERTS

**MCAE**

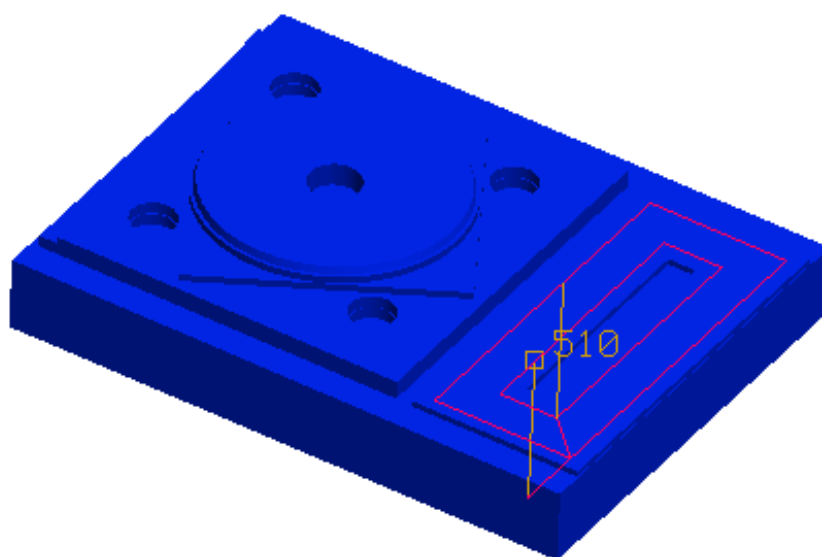
Výběrem makra o poloměru 10mm a úhlu 80 ° je optimalizováno nepříznivé najetí nástroje do místa počátečního řezu. Bezpečnost a přejezdy jsou voleny na 50 mm. Nástroj přesahuje při nájezdu a výjezdu o 50 % svého průměru. Prvky jsou měřené a je vhodné minimalizovat chybu tětiny. Je určena nejnižší možná tolerance 0,001 mm.

### 5.4.5 Dokončování D52

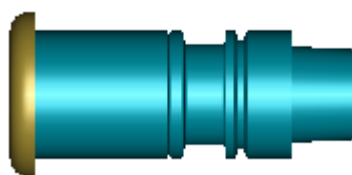
Pro poslední operaci obrábění je volena toroidní fréza s kulovými destičkami o poloměru 5mm. Problematika přísuvu záběru nástroje mezi jednotlivými drahami stěžuje programování viz. obr. 2.18 popsany v kapitole 2.8. V CAM softwaru Tebis je volena strategie obrábění po křivce, která je vymodelována z několika úseček, včetně nájezdu do řezu. Požadovanou dráhu zajistí výběr nastavení volbou korekce nástroje přes referenci a sledování načrtnuté křivky středem nástroje. Tabulka 5.9 popisuje trajektorie nástroje při dokončování a základní nastavení obrábění.

Tab. 5.9 Dokončování toroidní fréza D52 R5.

Dráhy nástroje generované v Tebisu 3.5 R8



Nástrojová sestava



Počet zubů [-]	5
Hloubka řezu [mm]	1
Cyklus obrábění [-]	sousledné
Řezná rychlost [m/min]	300
Otáčky [1/min]	1800
Posuvová rychlost [mm/min]	900

**tebis**  
THE CAD/CAM EXPERTS

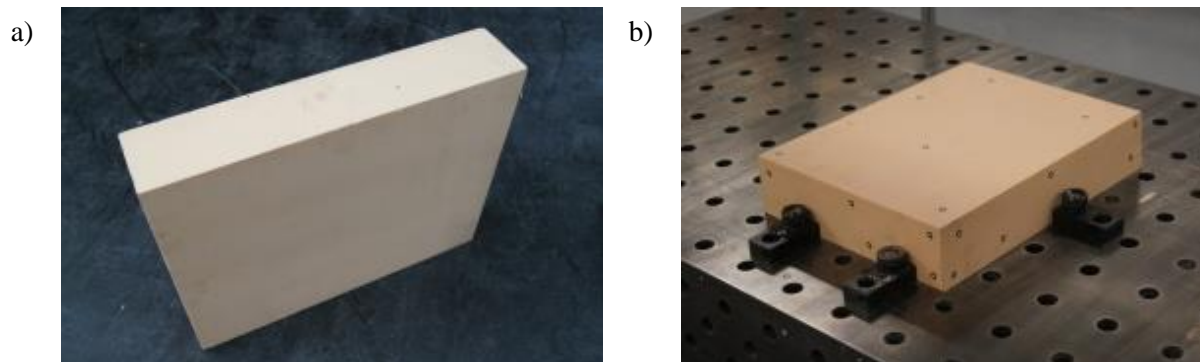
**MCAE**

Uvedený nástroj má kruhové destičky z SK, které pozitivně ovlivňuje drsnost povrchu. Pro potřeby měření přesnosti robota je vhodnější volit nástroj s ostrými rohy, který nebyl během měření k dispozici.

Nájezdy a výjezdy jsou u všech drah nadsazeny o hodnotu 200 mm v horizontální ose od počátku souřadného systému.

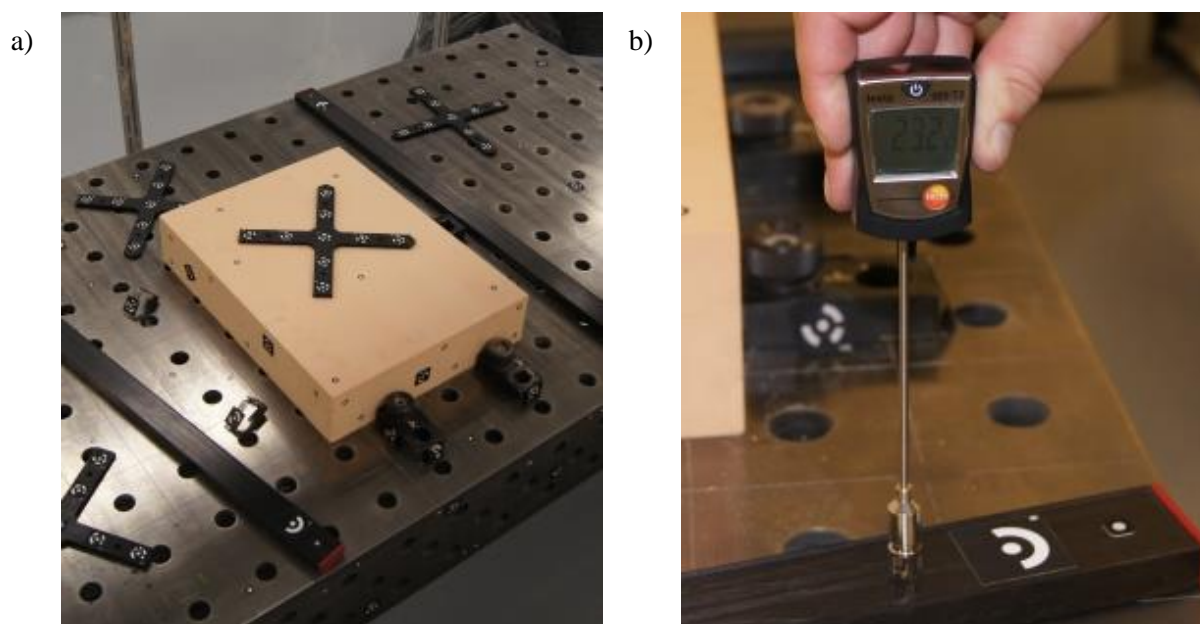
### 5.5 Příprava zkoušky

Posloupnost obrábění vychází z návrhu technologického postupu uvedeného v kapitole 3.18 technologický postup. Nejdůležitější částí zkoušek je obrábění načisto uvedenými nástroji se zvolenými řeznými podmínkami.



Obr. 5.3 Příprava a) polotovaru SikaBlock M330, b) upnutý polotovar k pracovnímu stolu.

Na obrázku 5.3a je zobrazen polotovar pro zkušební obrábění. Upnutí je řešeno šesti závrtnými šrouby, které jsou zavrtány do polotovaru ze spodu pracovního stolu. Vybrané upnutí je s ohledem pro lehké obrábění s nízkými řeznými odpory dostatečné. Polotovar je ustavený pomocí třech dorazů, které zajistí rovnoběžnost vůči stolu. Celá příprava upnutí je zaznamenána na obrázku 5.3b.



Obr. 5.4 Příprava pro měření a) systém Tritop, b) měření teploty kalibračních prvků.

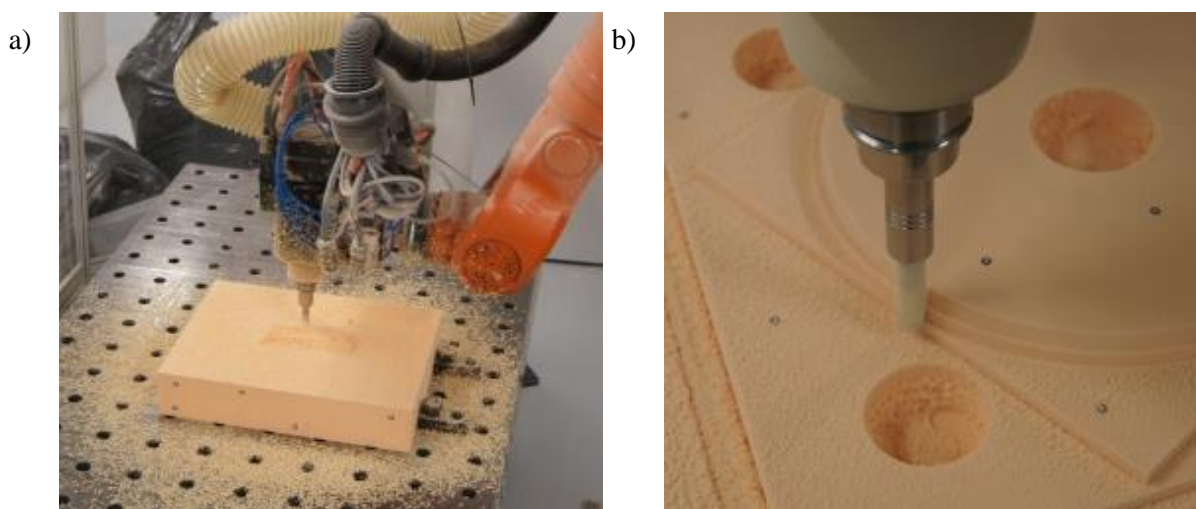
Před obráběním je upnutí polotovaru scanováno systémem Tritop za cílem určit jednotný počátek pro obrábění a měření. Systém je využit pro měření koncového adaptéru v kapitole 3.7 a na obrázku 5.4a je ukázka rozložení kalibračních křížů, tyčí a bodů. Pro kompenzaci tepelné roztažnosti kalibrovaných prvků je změřena teplota 23,2 °C a poté zapsána do výpočetního softwaru. Získaný souřadný systém je nahrán do CAM softwaru Tebis a obráběcí dráhy jsou vůči němu přepočteny.



### 5.6 Výroba zkušebního obrobku

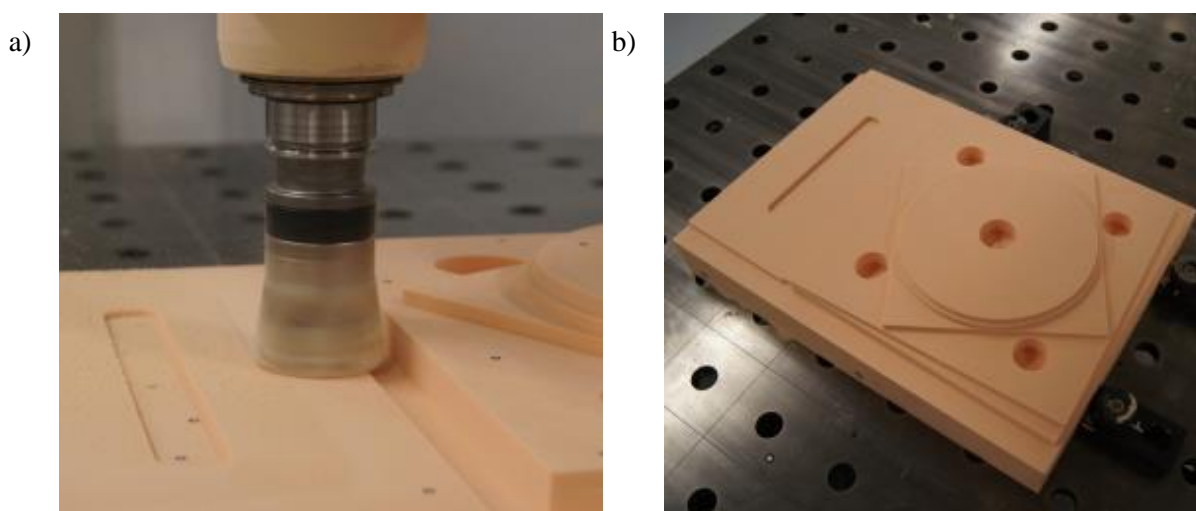
V návaznosti jednotlivých operací je obroben hrubý tvar s přídávky na čtyři měření. Následně jsou frézovány jen měřené prvky na zkušebním obrobku, které jsou po očištění od třísek skenovány.

Programy a nástroje jsou popsány v předchozích kapitolách a posloupnost jednotlivých operací je určena technologickým postupem obrábění, uvedený v návrhu metody kapitola 3.7. Na obrázku 5.5a je upnuta stopková fréza D18 pro hrubovací operaci s programem popsaným v tabulce 4.1. Následně jsou stejným nástrojem obrobena přídávky po hrubování, pro které jsou vypočteny dokončovací programy (viz. tab. 4.2).



Obr. 5.5 Obrábění zkušebního obrobku a) hrubování frézou D18, b) dokončování frézou D10.

Obrázek 5.5b zaznamenal dokončovací obrábění měřené plochy stopkovou frézou o poloměru 10mm. Programy jsou v tabulce 4.3 podrobněji popsány. Stejný nástroj byl použit pro hrubování drážky mezi tvarem pro měření čelního frézování a oblastí pro měření tvaru a polohy. Program je uveden v tabulce 4.3.



Obr. 5.6 Obrábění zkušebního obrobku a) dokončování toroidní frézou, b) zkušební obrobek.

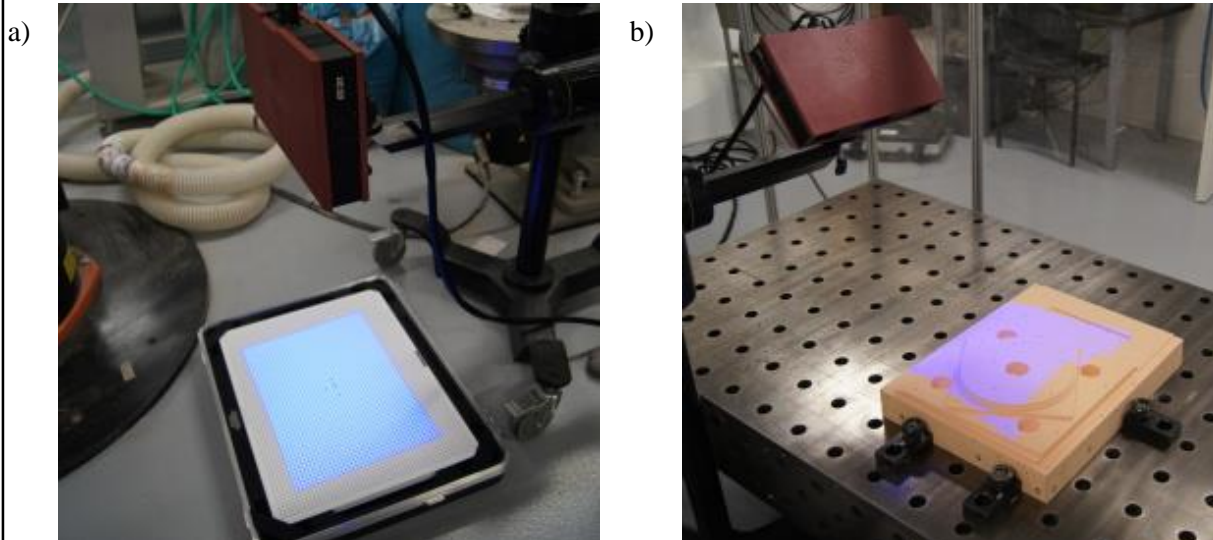
Toroidní fréza D52 je použita při obrábění oblasti čelního házení a na obrázku 5.6 je záběr získaný z praktické zkoušky, podrobně je program popsán v tabulce 4.4.

### 5.7 Měření zkušebního obrobku

Výsledný obrobek je po každém měření oskenován optickým systémem ATOS od firmy gom a vyhodnocen v softwaru GOM Inspect Professional.

#### 5.7.1 Příprava měřeného objektu

Rozměry referenčních bodů vybíráme s ohledem na velikost měřicího objemu. Umístění kalibračních bodů je vhodné volit na rovné plochy. V případě měření zkušební obrobku jsou určeny plochy, které se už neobrábí a není nutné body opakovaně nanášet.



Obr. 5.7 a) kalibrace systému ATOS, b) skenování zkušební obrobku

#### 5.7.2 Kontrola a ustavení zařízení

Před kalibrací je systém Atos vhodně ustaven v těsné blízkosti obrábění. Důvodem vybrané polohy systému je měření čtyř obrobků, kde zkušební díl zůstává připevněn ke stolu. Následně je provedena vizuální kontrola zapojení všech konektorů.

#### 5.7.3 Kalibrace zařízení

Pokud bylo před započítím měření zařízení transportováno, nebo došlo na senzoru k výměně měřicího objemu, je nutné zařízení kalibrovat. Postup je zachycen na obrázku 5.7a. Měřicí hlava je po zahřátí nasměrována na kalibrační panel a postupuje se pokyny z ovládacího softwaru. Vhodně nastavená kalibrace zajistí minimální odchylky, jinak postup opakujeme.

#### 5.7.4 Skenování obrobku

Pro měření v ovládacím softwaru je založen nový projekt, jsou doplněny základní parametry a je určena velikost referenčních bodů. Skenovací hlava se umístí před snímáný objekt a měří se parametr intenzity osvětlení proti nežádoucím odleskům. Po nastavení se přechází ke skenování (viz. obr. 5.7b). V průběhu snímání zkušební obrobku se nesmí pohybovat s měřicí hlavou skeneru ani se samotným obrobkem. Je vhodné zajistit klid na obráběcím pracovišti bez rušivých elementů, které mohou ovlivnit konečný výsledek měření. Pro získání skenu celého obrobku se nastaví systémem do nové pozice a pořízené snímky se sloučí pomocí referenčních bodů. V záběru musí být nejméně tři referenční body a to v případě obou kamer zároveň.

### 5.8 Vyhodnocení naměřených hodnot

Jednotlivé skeny jsou vyhodnoceny v softwaru Inspect Professional výrobce GOM mbH. Pro každý zkušební obrobek je vytvořen report zobrazený v příloze 7. Naměřené hodnoty přesnosti jsou uvedeny v tabulce 5.10 pro kruhové prvky a v tabulce 5.11 pro rovinné plochy.

Tab. 5.10 Naměřené přesnosti kruhových prvků na zkušebním obrobku tvaru a nastavení.

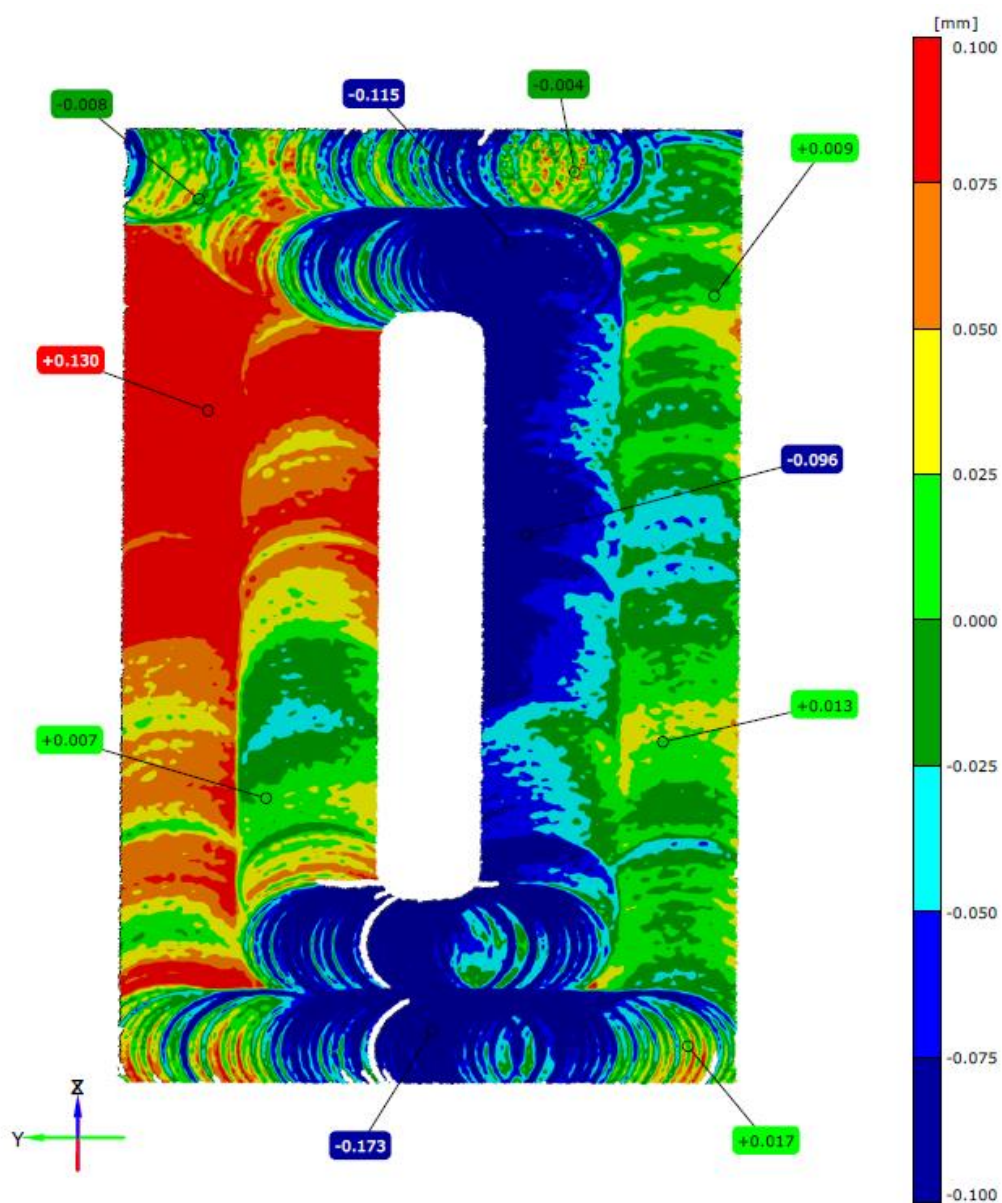
Předmět měření	Obrobek 1	Obrobek 2	Obrobek 3	Obrobek 4
Střední díra				
Válcovitost	0,228	0,237	0,235	0,318
Kolmost osy díry k základně A	0,025	0,023	0,020	0,031
Otvor D43				
Kruhovitost	0,017	-0,014	-0,038	-0,028
	0,049	0,012	-0,017	0,012
	0,044	0,005	-0,002	0,012
	0,094	0,052	0,058	0,061
Poloha ke střední díře C	0,119	0,252	0,061	0,083
	0,064	0,099	0,097	0,113
	0,097	0,054	0,081	0,151
	0,057	0,044	0,037	0,074
Otvor D45				
Soustřednost vnitřní díry s vnější dírou	0,322	0,372	0,143	0,113
	0,101	0,151	0,085	0,060
	0,101	0,183	0,064	0,159
	0,099	0,122	0,133	0,024

Tab. 5.11 Naměřené přesnosti ploch na zkušebním obrobku tvaru a nastavení.

Předmět měření	Obrobek 1	Obrobek 2	Obrobek 3	Obrobek 4
Čtverec				
Rovinnost stran	0,163	0,167	0,191	0,224
	0,109	0,127	0,143	0,200
	0,137	0,087	0,111	0,177
	0,108	0,104	0,109	0,120
Kolmost přilehlých stran k základně B	0,178	0,128	0,253	0,382
	0,354	0,306	0,416	0,275
Rovnoběžnost protilehlé strany se základnou B	0,197	0,217	0,269	0,244
Skloněný čtverec				
Rovinnost stran	0,201	0,211	0,132	0,284
	0,283	0,326	0,236	0,239
	0,201	0,289	0,255	0,248
	0,139	0,283	0,178	0,202
Přesnost úhlů k základně B	0,311	0,218	0,156	0,333
	0,323	0,255	0,250	0,281
	0,236	0,406	0,332	0,311
	0,145	0,164	0,233	0,220
Skloněné plochy				
Rovinnost ploch	0,161	0,179	0,219	0,276
	0,150	0,144	0,154	0,095
Přesnost úhlů k základně B	0,171	0,180	0,220	0,276
	0,341	0,334	0,422	0,233

Tab. 5.12 Naměřené přesnosti čelního házení na zkušební obrobku čelní frézování.

Předmět měření	Obrobek 1	Obrobek 2	Obrobek 3	Obrobek 4
Čtverec				
Rovinnost plochy	0,351	0,366	0,350	0,479
Rovnoběžnost plochy se základnou A	0,430	0,495	0,465	0,598



Obr. 5.8 Topologie povrchu obrobku 4 při měření přesnosti čelního frézování.



## 6 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ METODY MĚŘENÍ PŘESNOSTI SYSTÉMEM PONTOS

Praktická část diplomové práce ověřuje použitelnost navrhnuté metody na uvedených robotech. Systém Pontos výrobce GOM mbH a problematika metody je v předchozí kapitole 4 detailně popsána.

### 6.1 Příprava měření

Před měřením je nutné připravit prostor pro sestavu systému Pontos, která je složena z nosníku vysokofrekvenčních kamer a výpočetního počítače. Na obrázku 6.1 jsou patrné větší rozměry celého zařízení.

Výběr místa pro ustavení kamer je vhodné zvolit s ohledem na netečnost zvoleného prostoru, které po kalibraci musí být chráněno před nechtěnou manipulací během měření. Například omezení vstupu a výstupu z obráběcího pracoviště. V praktické části byl zjištěn problém s nevhodným položením datových kabelů spojující kamery s počítačem. Stojánek je nestabilní a zavadění o kabely vedlo k nežádoucímu posunu kamer, které bylo nutno překalibrovat.



Obr. 6.1 Použitá sestava systému Pontos.

Po rozložení systému je zvolena vhodná, roztečná tyč kamer v závislosti na vzdálenosti od měřeného prostoru a jeho objemu. Více popisuje graf v příloze 5. S konkrétní délkou je poté možno natočit kamery do vhodné pozice pomocí laseru.

V dalších krocích je provedeno nastavení kamer. Nastavení clony a následně kalibrace kamer pomocí kalibračního kříže, kde se snímají kalibrační body v automatizovaném procesu pro výsledné ustavení.



## 6.2 Výroba adaptéru s nosným prvkem

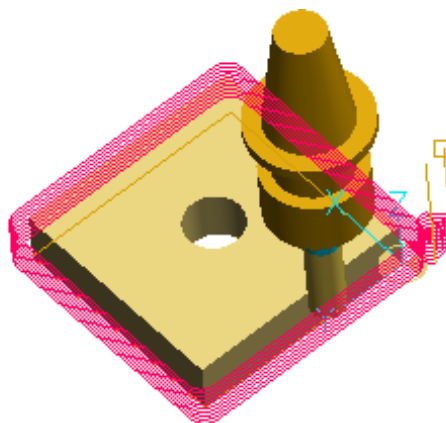
Z návrhu uvedeného v předchozí kapitole je vyroben jeden kus adaptéru pro nalepení kalibrovaných bodů. Uvedený adaptér je použit pro měření robota KR60 HA.

Výroba adaptéru probíhá na obráběcím stroji FVT3 viz. obr. 6.2a. Jedná se tříosou NC frézku s řídicím systémem Heidenhain TNC 410 výrobce Strojtos Lipník.

a)

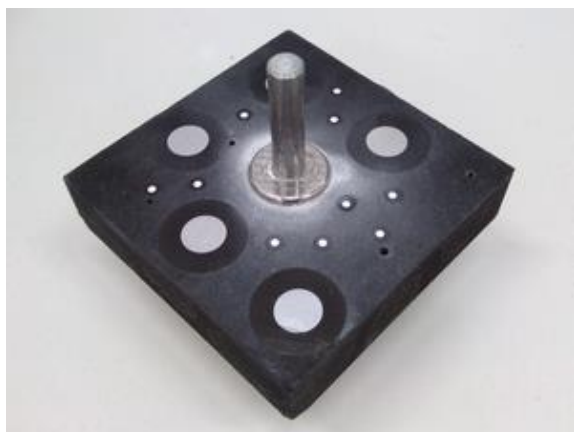


b)



Obr. 6.2 a) NC frézka FVT3 Strojtos Lipník, b) dokončovací program boku.

Výchozí polotovar je volen z dostupné PUR pěny SikaBlock M440, která poskytuje dostatečnou pevnost pro účely měření a zároveň je materiál dobře obrobitelný. Polotovar upnutý ve svěráku je zarovnán válcovou čelní frézou o průměru 80mm. Následně je obrobek přišroubován k položce z dřevotřísky, která umožňuje obrábět boky v celé hloubce. Po obrobení boků stopkovou frézou o průměru 16mm je vyfrézována dutina s přesahem 0,2mm. Programy pro obrábění jsou generovány v CAD, CAM softwaru Tebis (viz. obr. 6.2b) a následně spuštěny v systému Heidenhain stroje.

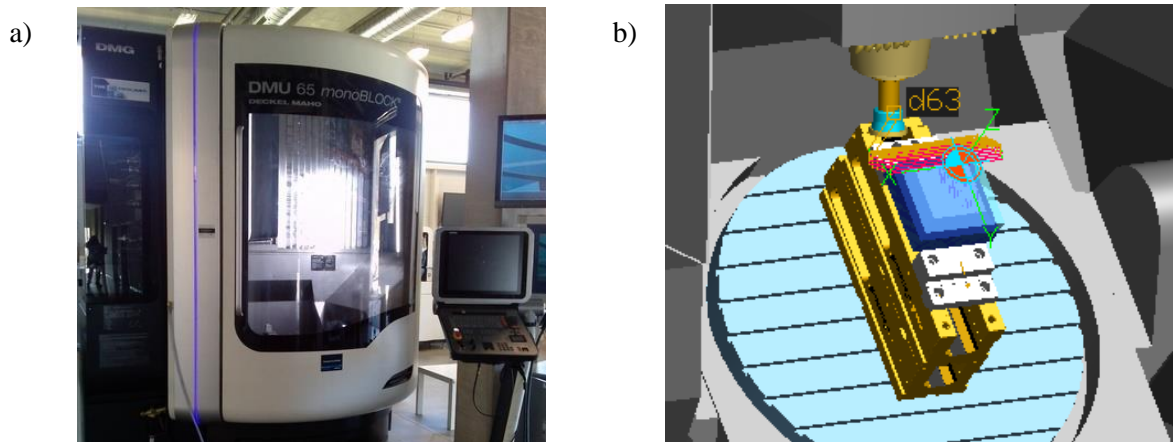


Obr. 6.3 Mechanický upínač s nosným prvkem detailní pohled.

Snímaný dřík, který představuje koncový bod je soustružený z ocelové tyče na výsledný průměr 12mm, délku 80mm a následně upnut do držáku. Spojení mezi deformovaným upínačem Tribos a nosným prvkem z PUR materiálu je mechanické, dokončené nalisováním. Otvor je frézován s vhodným přesahem vůči vnějšímu tvaru držáku. Detailně vyrobený adaptér popisuje obrázek obr. 6.3, kde jsou nalepeny kalibrační body.

### 6.3 Výroba adaptéru s nosným prvkem se sražením

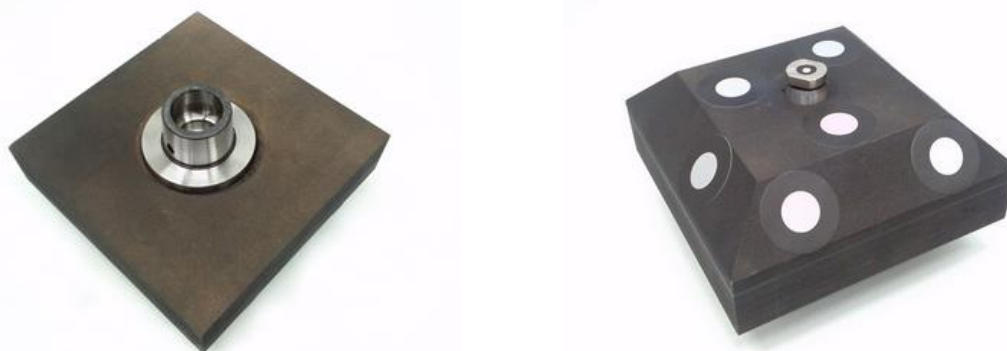
Z předchozích zkušeností u měření robota KR60 HA je pro následující zkoušky adaptér upraven. Hlavní změna je tvarová, kde nosná plocha není rovná, ale skosená pro lepší polohu snímaných bodů. Tvar dutiny je upraven na přechodové uložení s držákem. Upínač má větší rozměry a první koncový ejektor, který je už vyroben nelze použít. Dle návrhu uvedeného v kapitole 4.6.3 je vyroben jeden kus adaptéru.



Obr. 6.4 a) CNC obráběcí frézka DMG 65 Monoblock, b) dokončovací program.

Materiál SikaBlock M440 je stejný jako u prvního adaptéru. Z důvodů složitějšího tvaru je pro výrobu voleno pětiosé obráběcí centrum DMG 65 Monoblock. Natočení vlastního stolu stroje umožňuje rychlé a přesné obrobení ploch sražení, které se v případě použití tříosově řízené frézky obrábí pomocí kulové nebo tvarové frézky. Frézka pro výrobu je zobrazena na obrázku 6.4.

Nosný prvek adaptéru je nastříkán černou barvou pro docílení lepšího kontrastu. Po zaschnutí barvy je nalisován držák. Přišroubováním čepu do závitové díry, umístěné uprostřed držáku je koncový ejektor dokončen. Výsledný adaptér je zobrazen na obrázku 6.5 ze snímané strany a spodní část detailu upínacího kužele.



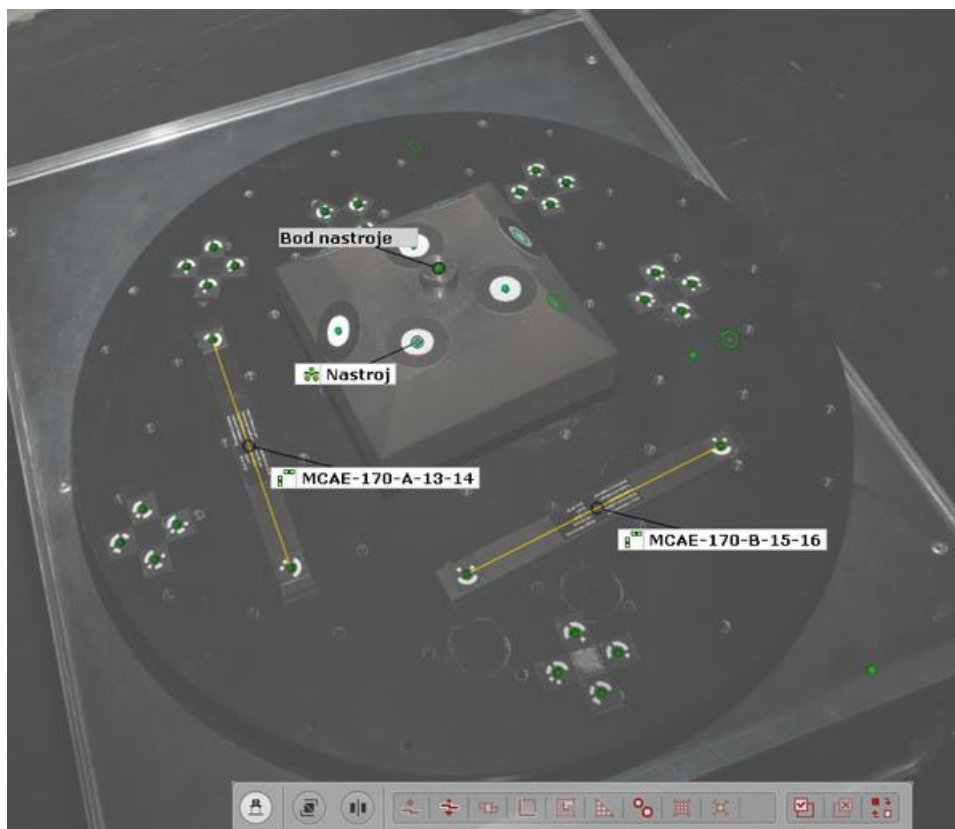
Obr. 6.5 Mechanický upínač s nosným prvkem, detailní pohled.

Přišroubovaný čep je opatřen zapuštěným, kalibrovaným bodem. Tento bod je výchozí pro vlastní tvorbu drah a měření pomocí systému Pontos. Použitá závitová díra slouží k zajištění frézovací hlavy. Uložení nedosahuje požadované přesnosti, ale v návaznosti na další postup není soustřednost koncového bodu nutná.

#### 6.4 Měření koncového adaptéru

Získání přesných poloh kalibrovaných bodů vůči programovanému bodu na adaptéru je předpokladem přesného měření. U návrhu metody měření systémem Pontos je pro uvedené téma věnovaná samotná kapitola 3.44, kde je stručně popsán postup.

Výchozím bodem je optická digitalizace koncového adaptéru polepeného dostatečným množstvím bodů. Hustota je volena pro dobrou čitelnost v prostoru, v závislosti na poloze koncového ejektoru.



Obr. 6.6 Fotogrametrie systémem Tritop.

Měření předchází umístění kalibrovaných bodů, které jsou vhodně rozloženy pro snadné skenování v okolí snímaného dílu. Postup je názorně zobrazen na obrázku 6.6. Uvedený prvek je připraven a snímán pomocí digitálního fotoaparátu z různých úhlů v prostoru.

Kalibrační tyče zobrazuje a popisuje obrázek 6.6, kde jsou přiloženy podél měřeného adaptéru. Pořízené snímky jsou nahrány do Software Tritop profesional V8, kde jsou vyhodnoceny a následně vypočteny přesné pozice nalepených kalibračních bodů.

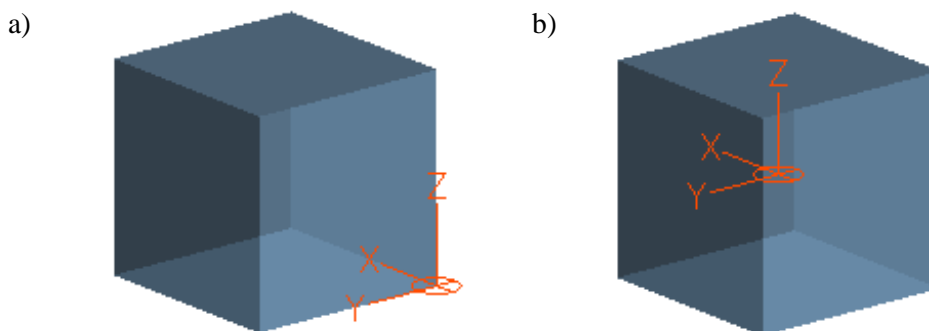
Program rozpoznává falešné body, které způsobuje nežádoucí odraz z měřeného prostředí. Podobně je nutné odstranit body vyskytující se nepravidelně, jsou špatně identifikovatelné a software je zamění za prvek na měřeném díle. Falešné body zvyšují nepřesnost a z jednotlivých snímků se musí odstranit. Po optimalizaci a vyčištění pořízených snímků jsou jednotlivé body spojeny do vazeb.

Pro programování měřených drah je nutné znát přesnou výškovou korekci nástroje. V softwaru Tritop je tato výška změřena a adaptér se zkosením je 74,93 mm vysoký.

### 6.5 Určení počátku souřadného systému

Jako první byly zadány souřadnice pro robota KR 60 HA, kde s pomocí koncového adaptéru definoval počátek umístěný na rohu pracovní krychle. Počátek souřadného systému je uvedený na obrázku 6.7a, kde se nachází výchozí bod pro měření.

Souřadný systém umístěný ve středu krychle je vybrán pro druhé měření robota KR 120, kde se rovnoměrněji rozloží nepřesnost (viz. 6.7b).



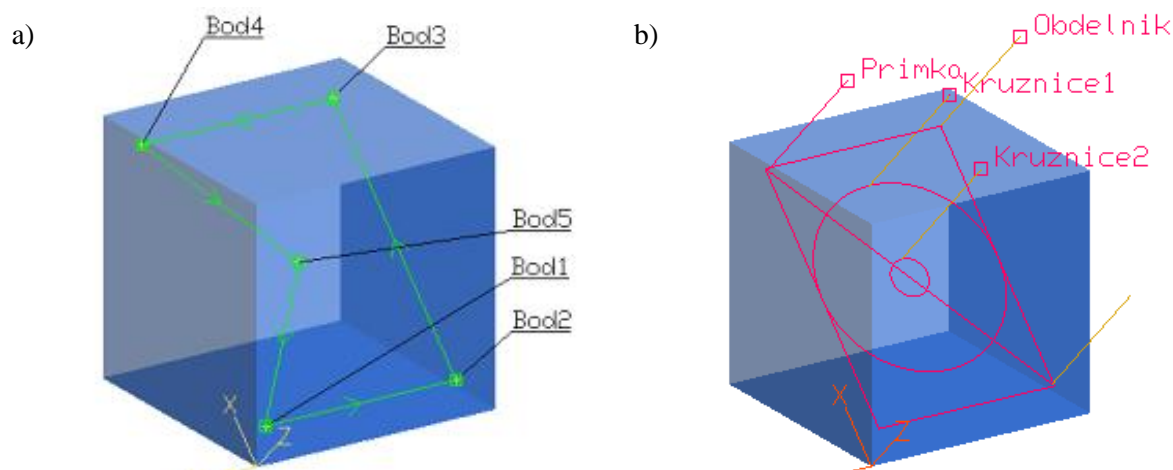
Obr. 6.7 Počátek souřadného systému a) na rohu pracovní krychle, b) uprostřed krychle.

Následně je v programu Tebis vygenerován program s dráhou, která symbolizují uvedený počáteční bod. Ten slouží k ustavení naměřených drah vůči výchozím křivkám, které kopíruje koncový efektor.

Pro snadné porovnání naměřených drah s výchozí křivkou je počátek představen dvěma přímkami. Přímký jsou totožné s osami x, y pro které je v software Tebis generován program kopírující jejich směr. V prvním měření je spuštěn program představující dvě osy počátku a systém kamer zaznamenává polohu adaptéru v prostoru. Vyhodnocující software naměřené přímký definuje jako vektory směru x, y, které stačí pro zavedení souřadného systému.

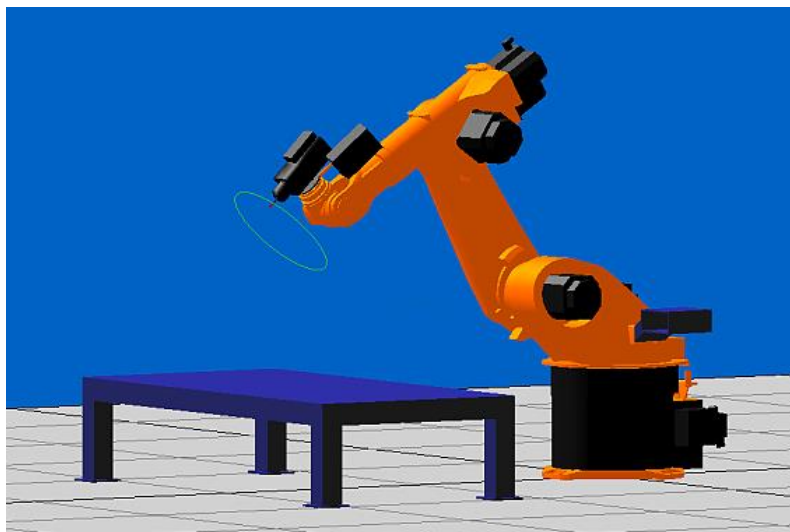
### 6.6 Tvorba NC programu

Tvorbě programu předchází vytvoření modelu pracovního prostoru dle normy ISO 9283. Kapitola 4.8 specifikuje rozměry krychle a na obrázku 6.8 jsou v ní zobrazeny programy vytvořené v softwaru Tebis.



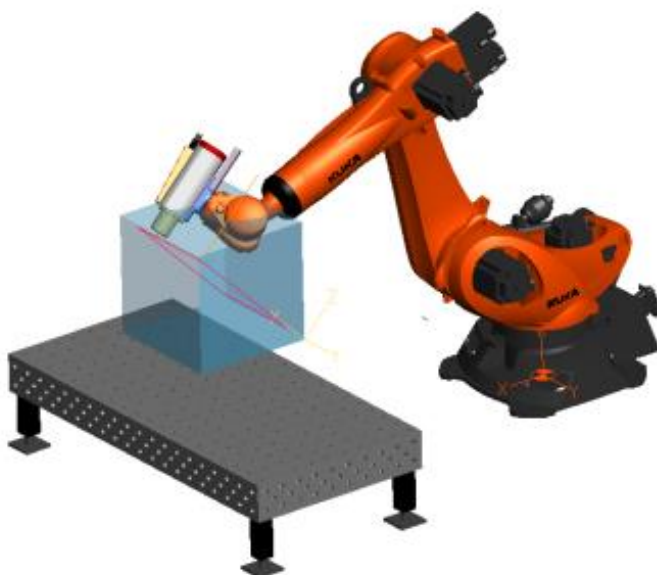
Obr. 6.8 CAM programy a) parametr polohy, b) parametr dráhy.

Pro robot KF 60HA je výstup drah z CAM Tebisu převeden na formát robota v softwaru Kuka CAMrob. Jednoduché pracovní prostředí je zobrazeno na obrázku 6.9 při simulování kružnicové dráhy. V prvním kroku je vytvořen pracovní prostor s robotem a obráběcím stolem. Poté je proveden export NC programu postprocesorem pro definovaný stroj v software Tebis, který se následně importuje do programu CAMrob. Zde probíhá nastavení všech důležitých parametrů dráhy. Mezi nejdůležitější parametry patří výběr správné báze a výšková korekce snímaného adaptéru. Je vypnuta filtrace drah a doplněna rychlost posuvu. Přidáním nájezdu a výjezdu se snadněji určí počátek a konec dráhy pro měření. Robot KF 60HA je možné nastavit na maximální posuv 60 000 mm/min.



Obr. 6.9 simulace dráhy Kružnice1 v softwaru CAMrob.

Mírně odlišný postup je volen u programování robota KR120, kde se výsledný program generuje pomocí beta modulu Roboter (viz. obr. 6.10). Modul zjednodušuje, zrychluje a zpřesňuje programování robotů pomocí softwaru Tebis. Robot KR120 pracuje na systému KRC4 pro který je uzpůsoben postprocesor generující NC dráhy přímo pro robota.

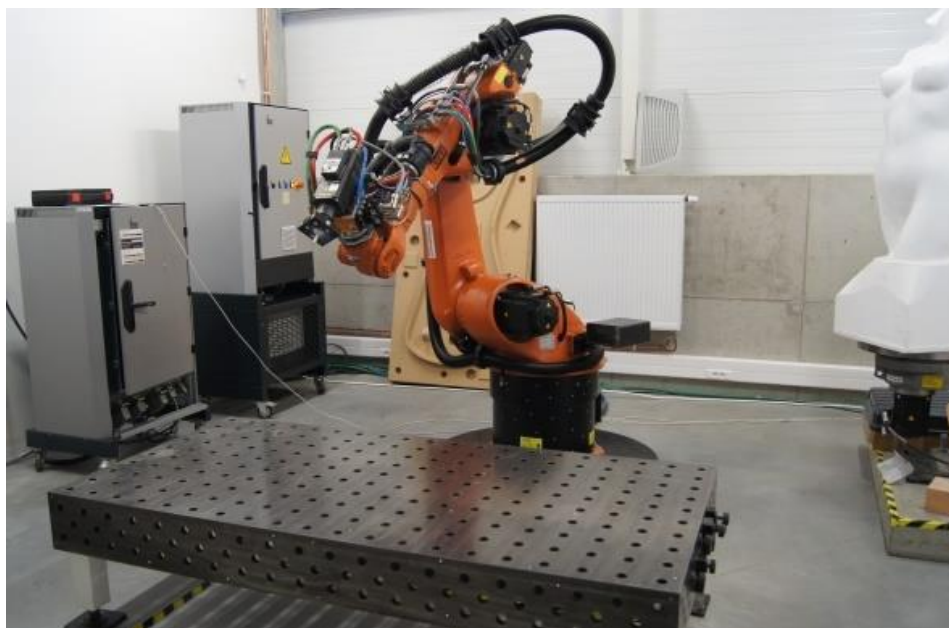


Obr. 6.10 Simulace dráhy obdélníku v softwaru Tebis Roboter.



### 6.7 Praktické měření

Zkoušky jsou měřeny v posloupnosti popsané v návrhu metody. Je nutné nastavit vhodnou frekvenci snímkování s dobou zkoušené dráhy, kde je pro každé měření předepsaná rychlost posuvu. Metodu je třeba vyzkoušet a poté sladit spuštění programu se snímáním. Při měření bodů je program spuštěn po bloku a vyfocen po zastavení pohybu adaptéru v konkrétním bodě



Obr. 6.11 Měření dráhy kružnice2 na robotu KF60 HA.

Proces měření trvá několik sekund, déle trvá uložení zachycených snímků z RAM paměti na harddisk v počítači.



Obr. 6.12 Praktické měření robota KR 120 R2700 extra HA.

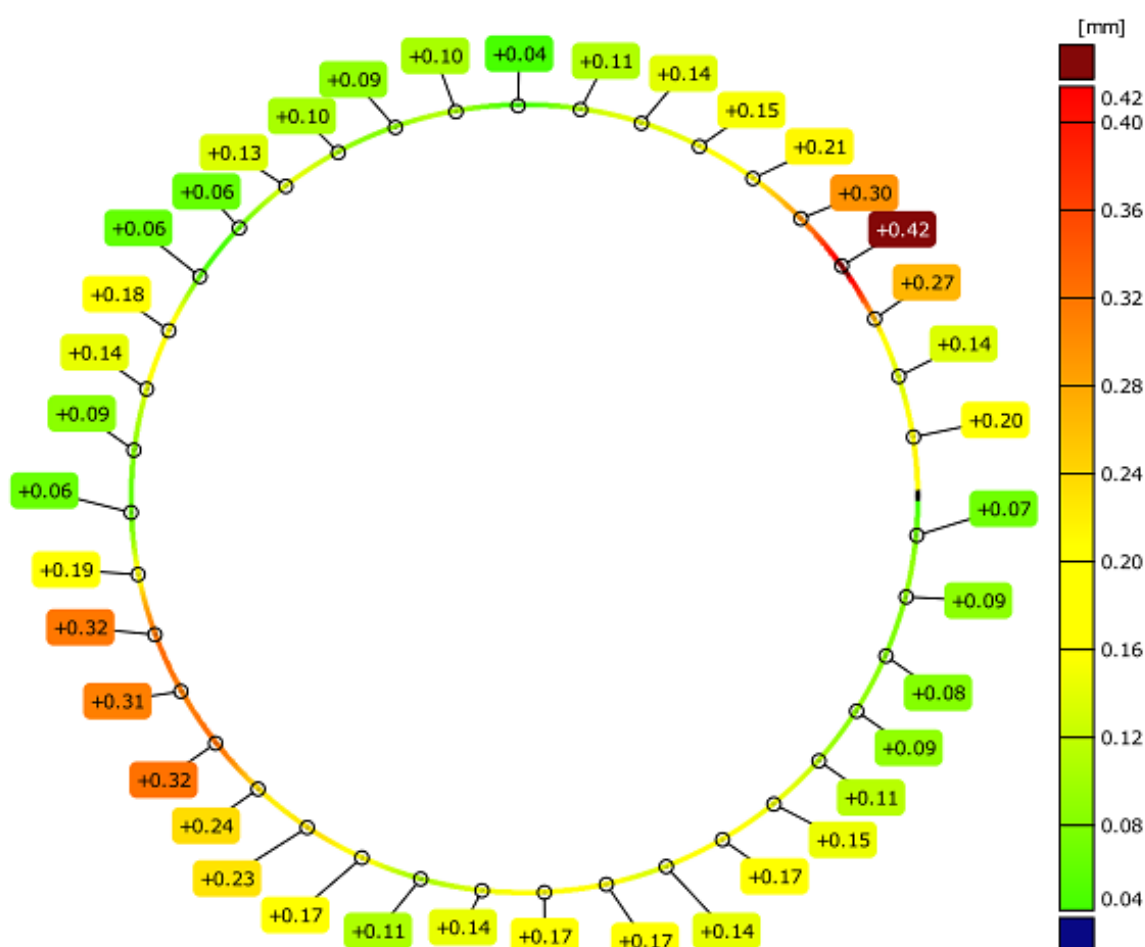


### 6.8 Výsledky a statické vyhodnocení

Vyhodnocení probíhá na základě porovnání výchozí a naměřené křivky. Do programu GOM Inspect Professional se importují křivky a body, které byly podkladem při tvorbě programu v CAM softwaru Tebis. Naměřené snímky se vyhodnotí a porovnají s výchozími, importovanými daty. Pro statické vyhodnocení, které je uvedeno na další straně, jsou vypočteny odchylky  $u_{Ri}$  a uloženy ve formátu Microsoft excel.

#### Kružnice 2 - 15000

Project: Měření robota  
Tester: MB  
Optical System: PONTOS



MCAE

Obr. 6.13 Ukázka vyhodnocení odchylek pro kružnici 2.

Vytvořené reporty ke všem drahám a rychlostem jsou vhodné pro vizuální posouzení přesnosti. Příkladem je na obrázku 6.13 ukázka měření kružnice 2 u robota KR 120 R2700 extra HA.

Z naměřených dat je vypočtena střední hodnota, rozptyl, směrodatná odchylka a medián. Výsledky jsou uvedeny v tab. 4.5 pro KR60 a tab. 4.6 pro KR120. Příklady výpočtu jsou pro dráhu kružnice1 při posuvové rychlosti 600 mm/s.

- Střední hodnota

$$\overline{u_R} = \frac{1}{n} \cdot \sum_i u_{Ri} = \frac{1}{183} \cdot (0,24 + 0,23 \dots + 0,28) = 0,256 \text{ mm} \quad (6.1)$$

kde:  $\overline{u_R}$  [mm] - střední hodnota,

$n$  [-] - počet měření,

$u_{Ri}$  [mm] - naměřená odchylka.

- Rozptyl

$$S_{u_R}^2 = \left( \frac{1}{n} \cdot \sum_i u_{Ri}^2 \right) - \overline{u_R}^2 = \frac{1}{183} \cdot (0,24^2 + \dots + 0,28^2) - 0,256^2 = 0,0145 \text{ mm}^2 \quad (6.2)$$

kde:  $S_{u_R}^2$  [mm<sup>2</sup>] - rozptyl,

$n$  [-] - počet měření,

$u_{Ri}$  [mm] - naměřená odchylka jednoho bodu,

$\overline{u_R}$  [mm] - střední hodnota odchylky.

- Směrodatná odchylka

$$S_{u_R} = \sqrt{S_{u_R}^2} = \sqrt{0,0145^2} = 0,120 \text{ mm} \quad (6.3)$$

kde:  $S_{u_R}$  [mm] - směrodatná odchylka,

$S_{u_R}^2$  [mm<sup>2</sup>] - rozptyl.

- Medián

$$\tilde{u}_R = \frac{1}{2} \left[ u_{R\frac{n}{2}} + u_{R\left(\frac{n}{2}+1\right)} \right] = \frac{1}{2} [0,27 + 0,27] = 0,27 \text{ mm} \quad (6.4)$$

kde:  $\tilde{u}_R$  [mm] - medián,

$u_{R\frac{n}{2}}$  [mm] - odchylka seřazeného bodu  $\frac{n}{2}$  podle velikosti,

$u_{R\left(\frac{n}{2}+1\right)}$  [mm] - odchylka seřazeného bodu  $\frac{n}{2} + 1$  podle velikosti.

Základní hodnoty odchylek  $u_{Ri}$  jsou získány porovnáním výchozí křivky s naměřenou. Program GOM Inspect Professional dokáže získané snímky pospojovat a vypočítat vzdálenost mezi vstupní dráhou a dráhou naměřenou. Vypracované reporty pro každou dráhu a rychlost jsou uvedeny v příloze 8 a 9. Popisují celé dráhy a lze takto inicializovat původ, oblast vzniku nepřesnosti a vizuálně ohodnotit výsledky měření.

Tab. 6.1 Vypočtené statistické hodnoty přesnosti pro robota KR 60 HA.

	Posuvová rychlost $v_f$ [mm/min]	Střední hodnota $\bar{u}_R$ [mm]	Maximální odchylka $u_{R\max}$ [mm]	Minimální odchylka $u_{R\min}$ [mm]	Rozptyl $S_{u_R}^2$ [mm <sup>2</sup> ]	Směrodatná odchylka $S_{u_R}$ [mm]	Medián $\tilde{u}_R$ [mm]
Kružnice1	600	0,25644	0,46	0,05	0,01454	0,12061	0,27
	15000	0,26019	0,44	0,1	0,00684	0,08273	0,25
	96000	-	-	-	-	-	-
Kružnice2	600	0,20024	0,34	0,05	0,00508	0,07129	0,2
	15000	0,09818	0,21	0,03	0,00229	0,04791	0,09
	96000	-	-	-	-	-	-
Přímka	600	0,15366	0,42	0,05	0,00590	0,07686	0,135
	15000	0,18965	0,45	0,1	0,00458	0,06772	0,18
	60000	0,34320	0,83	0,15	0,01302	0,11410	0,34
Obdélník	600	0,34162	0,65	0,01	0,02845	0,16869	0,37
	15000	0,34678	0,61	0,02	0,02306	0,15365	0,37
	60000	0,73805	1,07	0,17	0,02287	0,15123	0,75
Body	600	0,1675	0,26	0,04	0,00982	0,09912	0,185
	37800	0,2075	0,26	0,15	0,00229	0,04787	0,21
	96000	0,225	0,29	0,15	0,00336	0,05802	0,23

Obráběcí robot KR 60 HA je v provozu od roku 2009 a opotřebení stroje má negativní vliv na jeho výrobní přesnosti. Tabulka 4.5 podrobně popisuje naměřené a vypočítané hodnoty, které potvrzují horší stav robota v porovnání se zapůjčeným KR 120 R2700 HA. Při měření byla zjištěna maximální posuvová rychlost 60 000 mm/min. Vyšší rychlost nedovoluje omezení kinematiky robota, kde při vykreslování kružnice je ve velkém rozsahu součinnost jednotlivých os robota. Křivky obdélníku a přímky jsou změřeny na uvedenou rychlost posuvu v tabulce 6.1. Reporty jsou přiloženy v příloze 9.

Obráběcí robot KR 120 R2700 HA byl zapůjčen a jeho historie je neznáma. Vypočtené a změřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.2 a vykazují lepší přesnost na všech měřených prvcích v porovnání s typem KR60 HA. Reporty jsou přiloženy v příloze 8.

Tab. 6.2 vypočtené statistické hodnoty přesnosti pro robota KR 120 R2700 extra HA.

	Posuvová rychlost $v_f$ [mm/min]	Střední hodnota $\bar{u}_R$ [mm]	Maximální odchylka $u_{R\max}$ [mm]	Minimální odchylka $u_{R\min}$ [mm]	Rozptyl $S_{u_R}^2$ [mm <sup>2</sup> ]	Směrodatná odchylka $S_{u_R}$ [mm]	Medián $\tilde{u}_R$ [mm]
Kružnice1	600	0,16702	0,31	0,03	0,00581	0,07628	0,165
	15000	0,21208	0,44	0,06	0,01018	0,10090	0,185
	96000	0,21974	0,47	0,05	0,01528	0,12361	0,17
Kružnice2	600	0,13089	0,22	0,04	0,00317	0,05631	0,14
	15000	0,16107	0,42	0,04	0,00725	0,08517	0,14
	96000	0,15727	0,41	0,05	0,00680	0,08248	0,14
Přímka	600	0,09444	0,17	0,04	0,00117	0,03426	0,09
	15000	0,102	0,2	0,04	0,00166	0,0408	0,1
	96000	0,12299	0,22	0,05	0,00254	0,05039	0,11
Obdélník	600	0,13333	0,32	0,02	0,00369	0,06074	0,13
	15000	0,12695	0,3	0,02	0,00352	0,05939	0,12
	96000	0,12625	0,27	0,01	0,00300	0,05478	0,12
Body	600	0,27	0,36	0,15	0,00755	0,08689	0,25
	37800	0,6275	0,82	0,47	0,03042	0,17442	0,61
	96000	0,305	0,37	0,25	0,0027	0,05196	0,3

Maximální rychlost posuvu je u typu KR 120 R2700 HA vyšší a dovoluje měřit posuvem 96000 mm/min všechny křivky. Z vypočtených hodnot je patrný směr růstu odchylky s rychlostí posuvu. Zhoršení přesnosti není značné a v případě měření polohy orientace bodů je naopak lepší.

Naměřená data jsou blízká reálným hodnotám přesnosti obráběcích robotů se zvýšenou přesností. Cílem zkoušek je praktické ověření metody, měření přesnosti pomocí systému Pontos a dosažené výsledky měření umožňují metodiku dále rozvíjet a zdokonalovat.

## 7 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VYBRANÉHO ŘEŠENÍ

Ekonomické zhodnocení posuzuje náklady navržených metod pro budoucí zákazníky s cílem zajistit nutný profit. Je řešena otázka nákladů v závislosti na potřebném čase vybrané metody měření. Do nákladu není zahrnuta pořizovací cena systému a softwaru.

### 7.1 Spotřeba času

Spotřeba času metodiky měření souvisí s konkretizací časové a nákladové náročnosti vybraného procesu.

Obecné třídění spotřeby času lze definovat na čas nutný (čas měření, vyhodnocení) a čas vedlejší (doprava, přenos k měřenému stroji).

V rámci diplomové práce jsou vedlejší časy opomenuty. Je řešena finanční náročnost vybrané metodiky měření, ve které nejsou započteny nečekané události, doprava a bližší specifikata zadavatele.

#### 7.1.1 Zkušební obrobek

Měření pomocí metody výrobou zkušebního obrobku zahrnuje, obrábění, měření, vyhodnocení naměřených dat. Problematika rozdělení času je rozsáhlá a s přihlédnutím na praktické měření, je výpočet zjednodušen. Pro rozdělení jednotlivých časů je nutné zohlednit, přítomnost pracovníků v místě měření po konkrétní dobu.

Potřebný čas pro obrábění zahrnuje:

- zakoupení a proměření nástrojů,
- upnutí a nákup polotovaru,
- tvorba NC drah a modelu zkušebního obrobku,
- obrábění zkušebního obrobku.

Čas pro měření, zahrnuje:

- měření systémem Tritop,
- měření systémem ATOS.

Čas pro vyhodnocení zahrnuje:

- výpočet naměřených dat,
- vyhodnocení naměřených dat.

$$t_C = t_o + t_m + t_v \quad (7.1)$$

kde: $t_C$ [min]	- celkový čas,
$t_o$ [min]	- čas obrábění zkušebního obrobku,
$t_m$ [min]	- čas měření zkušebního obrobku,
$t_v$ [min]	- čas potřebný pro vyhodnocení.

$$t_C = 415 + 120 + 180 = 715 \text{ min}$$

### 7.1.2 Měření systémem Pontos

Měření systémem Pontos zahrnuje časy pro tvorbu programu, měření a vyhodnocení naměřených dat. Vyrobené adaptéry jsou použitelné pro další zkoušky a nejsou započteny do potřebných časů a nákladů.

Čas pro přípravu robota zahrnuje.

- tvorba NC drah,
- převod na řídicí systém robota,
- určení vhodné báze v pracovním prostoru a pouštění jednotlivých programů.

Čas měření parametru polohy a dráhy zahrnuje:

- měření koncového adaptéru,
- příprava a kalibrace systému,
- vlastní měření parametru polohy a dráhy.

Čas pro potřebný pro vyhodnocení zahrnuje:

- výpočet naměřených dat,
- vyhodnocení naměřených dat.

$$t_C = t_r + t_{mp} + t_{vp} \quad (7.2)$$

kde: $t_C$ [min]	- celkový čas,
$t_r$ [min]	- čas přípravy robota,
$t_{mp}$ [min]	- čas měření parametru polohy a dráhy,
$t_{vp}$ [min]	- čas potřebný pro vyhodnocení.

$$t_C = 240 + 360 + 360 = 960 \text{ min}$$

### 7.2 Náklady navržených metod

Náklady na měření jsou určeny základními činiteli výrobního procesu:

- pracovník,
- pracovní prostředek,
- předmět práce.

Výpočet konečné ceny vybrané metody je roven:

- součtu nákladů  $N$  na provoz měřicího zařízení za čas  $t$ ,
- počtu specializovaných pracovníků,
- cenu nástrojů, přípravků a polotovaru.



### 7.2.1 Zkušební obrobek

Výpočet celkové ceny vybrané metody je roven součtu nákladů:

- náklady pro obrábění zkušební obrobku  $N_o$ ,
- náklady pro měření systémy Atos a Tritop a vyhodnocení v softwaru Gom Inspect.

Cena měření a vyhodnocení  $N_m$  je po konzultaci s obchodním oddělením firmy MCAE Systems snížena. Byla získána nabídka jednoho skenování a vyhodnocení za cenu 4000 Kč. Na zkušební obrobku jsou provedena celkem čtyři měření a vyhodnocení za celkovou cenu 16 000 Kč.

$$N_C = N_o + N_m \quad (7.3)$$

kde:  $N_C$  [Kč] - celkové náklady,

$N_o$  [Kč] - náklady na výrobu zkušební obrobku (viz. 7.4),

$N_m$  [Kč] - náklady pro měření a vyhodnocení.

$$N_C = 12557 + 16000 = 28557 \text{ Kč}$$

Měření vyžaduje ostré nástroje, které jsou započítány v nákladech pro výrobu zkušební obrobku. Hrubovací a dokončovací nástroje jsou zakoupeny u společnosti M&V. Předpokladem je, že zákazník disponuje potřebnými upínači, které je jinak nutné dokoupit a přičíst do nákladů zkoušky.

- Fréza stopková Master, 81680, 10×22 mm TiAlN, cena 759 Kč,
- Fréza válcová čelní F610973, 40×32 mm, cena 1503 Kč,
- Fréza válcová čelní, s přerušovaným ostřím, F142218, 18×32 mm, cena 749 Kč.

Pro zkoušku je zakoupen materiál o rozměrech 1500×500×100 mm a celkové ceně 4300 Kč. Následně je rozdělen na čtyři polotovary potřebných rozměrů o ceně 1075 Kč za kus.

$$N_o = N_{ro} + N_n + N_p \quad (7.4)$$

kde:  $N_o$  [Kč] - náklady pro výrobu zkušební obrobku,

$N_{ro}$  [Kč] - náklady pro obsluhu robota (viz. 7.5),

$N_n$  [Kč] - náklady na nástroje,

$N_p$  [Kč] - náklady na polotovar.

$$N_o = 8471 + 3011 + 1075 = 12557 \text{ Kč}$$

Náklady pro obsluhu robota jsou vypočteny z časů pro obrábění a měření. Jsou provedena čtyři měření a čtyři obrábění na jednom zkušební obrobku. Během praktické zkoušky je přítomný operátor robota.

$$N_{to} = \frac{t_o + t_m}{60} \cdot N_{hs} \quad (7.5)$$

kde:  $N_{to}$  [Kč] - přepočtené náklady na obsluhu robota za čas,

$t_o$  [min] - čas obrábění,

$t_m$  [min] - čas měření,

$N_{hs}$  [Kč] - hodinová sazba obsluhy robota.

$$N_{to} = \frac{415 + 120}{60} \cdot 950 = 8471 \text{ Kč}$$

### 7.2.2 Měření systémem Pontos

Výsledný výpočet celkové ceny vybrané metody je roven součtu nákladů:

- náklady pro přípravu a obsluhu robota,
- náklady pro měření systémem Pontos,
- náklady pro vyhodnocení.

$$N_C = N_r + N_{mp} + N_{vp} \quad (7.6)$$

kde:  $N_C$  [Kč] - celkové náklady,

$N_r$  [Kč] - náklady na obsluhu a přípravu robota (viz. 7.7),

$N_{mp}$  [Kč] - náklady pro měření systémem Pontos (viz. 7.8),

$N_{vp}$  [Kč] - náklady pro vyhodnocení měření (viz. 7.9).

$$N_C = 9500 + 18000 + 6000 = 33500 \text{ Kč}$$

$$N_r = \frac{t_r + t_{mp}}{60} \cdot N_{hr} \quad (7.7)$$

kde:  $N_r$  [Kč] - náklady na obsluhu a přípravu robota,

$t_r$  [min] - čas přípravy robota,

$t_{mp}$  [min] - čas měření parametru polohy a dráhy,

$N_{hr}$  [Kč] - hodinová sazba pro obsluhu robota.

$$N_r = \frac{240 + 360}{60} \cdot 950 = 9500 \text{ Kč}$$

$$N_{mp} = \frac{t_{mp}}{60} \cdot N_{hp} \quad (7.8)$$

kde:  $N_{mp}$  [Kč] - náklady pro měření systémem Pontos,  
 $t_{mp}$  [min] - čas měření parametru polohy a dráhy,  
 $N_{hp}$  [Kč] - hodinová sazba pro měření systémem Pontos.

$$N_{mp} = \frac{360}{60} \cdot 3000 = 18000 \text{ Kč}$$

$$N_{vp} = \frac{t_{vp}}{60} \cdot N_{hv} \quad (7.9)$$

kde:  $N_{vp}$  [Kč] - náklady pro vyhodnocení měření,  
 $t_{vp}$  [min] - čas potřebný pro vyhodnocení,  
 $N_{hv}$  [Kč] - hodinová sazba pro vyhodnocení měření.

$$N_{vp} = \frac{360}{60} \cdot 1000 = 6000 \text{ Kč}$$

### 7.3 Ekonomické porovnání metod

V tabulce 7.1 jsou znázorněny náklady a spotřební časy pro jednotlivé metody. Je patrné, že spotřeba času má velký vliv na konečnou cenu vybrané metodiky. Měření přesnosti výrobou zkušebního obrobku je jednodušší a o 25,52 % rychlejší. Z uvedených časů nelze činit konečné závěry, jedná se o návrhy a výsledná cena zkoušek je snadno ovlivnitelná.

Tab. 7.1 Časová a finanční náročnost navržených metod.

Navržená metoda	Spotřeba času [min]	Náklady [Kč]
Zkušební obrobek	715	28557
Systém Pontos	960	33500

Vyšší spotřeba času metody měření systémem Pontos prodražuje návrh o 17,31 % vůči metodě se zkušebním obrobkem. Volbou rozsahu měření a počtem opakování, lze velmi snadno splnit rozpočet budoucího zákazníka. Správný výběr metody a její upřesnění závisí na požadavcích zadavatele.

Ceny jsou uvedeny bez daně z přidané hodnoty. Zveřejněné hodinové sazby platí pro speciálně vyškolený personál s vysokoškolským vzděláním. Do nákladů není započtena pořizovací cena zařízení, softwaru, dopravy nebo jiné speciální požadavky.

## DISKUSE

Nižší přesnost je hlavní nevýhodou metody měření systémem Pontos. Při vhodném nastavení je nutné počítat s přesností do 0,1 mm. Pro měření robotů se jedná o dostatečnou toleranci, která ovšem musí být zohledněna ve výsledku měření. Při měření zkušebního obrobku je použit systém Atos Core300. Jeho přesnost 0,03 mm je pro potřeby diplomové práce dostačující.

Vyhodnocené hodnoty odpovídají stavu měřeného zařízení a potvrzují teoretické návrhy obou metod. V praktické části je otestován robot KR60 HA a pro měření systémem Pontos také robot KR 120HA.

Nabízí se porovnání obou robotů po vyhodnocení praktických měření systémem Pontos. Je nutné upozornit na odlišné historie strojů a na mírně upravený postup měření. Dráhy pro KR120HA jsou celé vytvořeny a posléze převedeny v softwaru Tebis. KR 60HA má starší řídicí systém a programy jsou převedeny v softwaru CAMrob. Koncový adaptér je také odlišný. Naměřená přesnost robotů je uvedena ve výsledcích diplomové práce a je zjištěna lepší přesnost zapůjčeného robota KR120HA.

Pro vypočtené náklady obou metod je nutné upozornit na problematiku, přejímání dat a přípravků pro další měření. Příkladem vytvořené NC dráhy, adaptéry a CAD modely jsou využitelné na další měření, případně se nechají lehce modifikovat. Tím odpadá náročná příprava, která v prvotních krocích diplomové práce vyžaduje velké úsilí.

Optimalizace metodiky měření přesnosti robotů je navržena v konkrétních bodech:

- Obráběcí roboty je vhodné zkoušet na přesnost posuvových rychlostí. Problematika je řešena, ale pro navržení a otestování není v diplomové práci více prostoru.
- Praktické měření odhalilo horší přesnost robota KR 60HA. Stroj je v provozu od roku 2009 a byl vystaven několika kolizím. Jeho tuhost není optimální a nabízí se myšlenka pro ověření a porovnání statické tuhosti. Návrh vychází z osově zátěže koncového efektoru určitými silami. Robot je ve statické poloze a je měřeno vybočení v konkrétním směru a při určité síle. Pro tyto účely je nutné navrhnout konstrukci stavitelnou k pracovnímu stolu a inicializovat zdroj zatěžující síly pro konkrétní směry. Změření odchylek je vhodné měřit kontaktními měřidly nebo dostupnými optickými systémy.
- Měření tuhosti obráběcích robotů lze řešit s přihlédnutím na řezné síly. Například volbou odlišného materiálu zkušební obrobku docílíme rozdílné zátěže pro měřeného robota. Použitím několika materiálu v odlišných pevnostech je možné experimentálně posoudit vliv řezných sil na celkovou přesnost. Vhodně zvoleným nastavením řezných podmínek je také možno měnit velikost řezné síly. Metoda je snadno aplikovatelná pro testovaný zkušební polotovar.
- Metodika měření přesnosti systémem Pontos není v praktické části řešena opakovaně a nelze spočítat statistické hodnoty pro opakovatelnost. Tato problematika vyžaduje měření opakovat v několika cyklech, o stejné rychlosti a zatížení. Zkouška klade velké nároky na čas při měření a vyhodnocení.
- Při obrábění zkušební obrobku je použita toroidní fréza, která díky kulovým destičkám zmírňuje dopady nepřesnosti na obráběný povrch. Lepší volbou je válcová čelní fréza nebo nástroj s minimálním rádiusem destiček.

## ZÁVĚR

Diplomová práce popisuje a experimentálně ověřuje návrhy dvou metod měření přesnosti obráběcích robotů. Po studiu teoretických informací je navrženo měření pomocí zkušebního obrobku a optického systému Pontos. Závěrem práce je provedeno ekonomické zhodnocení.

Metodou obrábění zkušebního obrobku bylo dosaženo teoretických a praktických cílů uvedených v bodech:

- Navrhnutí a vymodelování zkušebního obrobku pro čtyři měření.
- Pro diplomovou práci jsou v CAM softwaru Tebis naprogramovány obráběcí dráhy a proměřeny nástroje na zařízení DMG Microset. Vygenerované NC kódy drah byly převedeny na řídicí systém robota v softwaru CAMrob.
- Experimentální část popisuje přípravu a obrábění zkušebního obrobku, který byl změřen systémem Atos Core300. Získané snímky jsou v softwaru Gom Inspect vyhodnoceny a porovnány s výchozím modelem. Naměřené odchylky jsou uvedeny v diplomové práci a reporty naměřených prvků uloženy v příloze.
- Z vyhodnocených dat a při bližším prozkoumání zkušebního obrobku je patrná nižší přesnost měřeného robota KR60 HA. Za hlavní příčinu nepřesností je považována nedostatečná tuhost při posuvu ve směru os X a Z. Prozkoušením jednotlivých ramen robota bylo zpozorováno chvění na jeho druhé ose A2.
- Praktické měření ověřilo použitelnost teoretického návrhu metody zkušebního obrobku pro měření přesnosti obráběcích robotů.

Při návrhu druhé metody měření přesnosti systémem Pontos bylo dosaženo:

- V práci jsou navrhnuté a posléze vyrobeny dva koncové adaptéry. Experimentální měření ověřilo vhodnost obou přípravků.
- Byly popsány návrhy měření parametru polohy a parametru dráhy.
- Pro navrhnuté body a dráhy byly vytvořeny v CAM programu Tebis programy, které byly převedeny na řídicí systém robota. Pro robot KR 60HA byl použit software CAMrob a pro robot KR120HA modul Tebis Roboter.
- Při praktickém měření systémem Pontos se experimentálně naměřila data dle postupu navrhnuté metodiky.
- Porovnáním naměřených drah s výchozím prvkem bylo vyhodnoceno v softwaru GOM Inspect Professional. Vypočtené hodnoty jsou v diplomové práci zapsány a byly použity při vytváření reportů.
- Byl proveden výpočet statistických hodnot jako střední hodnota, maximální, minimální odchylka, rozptyl, směrodatná odchylka a medián.
- Naměřené a vypočtené hodnoty obou robotů dosahují reálných přesností zvolené technologie obrábění. Z vypočtených hodnot je patrný směr růstu odchylky s rychlostí posuvu, ale nepřesnost je udržována v rozumných mezích. V porovnání obou robotů dosahuje KR 120HA lepší přesnosti v řádu jedné desetiny.
- Experimentální zkoušky ověřily vhodnost navržené metody měření přesnosti systémem Pontos pro obráběcí roboty.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. WORLD ROBOTICS. 2014. *Industrial Robots 2014: Executive Summary* [online]. [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: [http://www.worldrobotics.org/uploads/media/Executive\\_Summary\\_WR\\_2014\\_02.pdf](http://www.worldrobotics.org/uploads/media/Executive_Summary_WR_2014_02.pdf)
2. KUKA ROBOT GROUP. *KUKA.Milling 8kW*. Germany, 2007.
3. POCHYLÝ, Aleš. Ústav výrobních strojů systémů a robotiky Fsi Vut v Brně. *Úvod do průmyslové robotiky*. Brno, 2012.
4. HAVEL, Ivan M. *Robotika: úvod do teorie kognitivních robotů*. Praha: SNTL, 1980, 279, [1] s.
5. POCHYLÝ, Aleš. Vysoké učení technické v Brně, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. *Úvod do problematiky off-line a CAD/CAM programování robotů: Off-line Programování průmyslových robotů*. Brno, 2012.
6. BRYCHTA, Josef, Robert ČEP a Jana PETRŮ. *Výrobní stroje obráběcí* [online]. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013, 145 s. [cit. 2014-02-14]. ISBN 978-80-248-2941-8. Dostupné z: <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&ved=0CFsQFjAD&url=http%3A%2F%2Fwww.346.vsb.cz%2FVSO.pdf&ei=O1X-Us8Zx4O0Bpi9gIAO&usg=AFQjCNH07kNyHmqnrNBwFkstSbBqjugtkQ&sig2=tv5HJU5pNqpNayGgx3pW0Q&bvm=bv.61535280,d.Yms>
7. KUKA ROBTER GMBH. *Odvětví/řešení: Spokojenost s frézováním* [online]. [cit. 2014-02-15]. Dostupné z: [http://www.kuka-robotics.com/cs/solutions/solutions\\_search/L\\_USA\\_Large\\_Scale\\_Architectural\\_Milling.htm](http://www.kuka-robotics.com/cs/solutions/solutions_search/L_USA_Large_Scale_Architectural_Milling.htm)
8. SMUTNÝ, Vladimír. *Řízení robotů: Přesnost kinematického modelu* [online]. [cit. 2014-02-15]. Dostupné z: <http://cmp.felk.cvut.cz/cmp/courses/ROB/roblec/rizeni-notecz.pdf>
9. W. NOVOTNÝ, Lubomír. Technický týdeník. *Konstrukce CNC obráběcích strojů (7)* [online]. 2013, č. 5 [cit. 2014-02-16]. DOI: ISSN 0040-1064. Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/konstrukce-obrabecich-stroju/konstrukce-cnc-obrabecich-stroju-7\\_20937.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/konstrukce-obrabecich-stroju/konstrukce-cnc-obrabecich-stroju-7_20937.html)
10. BRAVENEC, Libor. *Polohování CNC frézky dle normy ISO 230-2* [online]. 2012 [cit. 2014-02-16]. Dostupné z: [https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CDkQFjAC&url=http%3A%2F%2Fdspace.k.utb.cz%2Fbitstream%2Fhandle%2F10563%2F23058%2Fbravenec\\_2012\\_dp.pdf%3Fsequence%3D1&ei=tBUBU5uzNdOQhQetj4HIDA&usg=AFQjCNHn3loibKepIfzMNlbW5y\\_FjYdvNQ&bvm=bv.61535280,d.ZG4&cad=rja](https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CDkQFjAC&url=http%3A%2F%2Fdspace.k.utb.cz%2Fbitstream%2Fhandle%2F10563%2F23058%2Fbravenec_2012_dp.pdf%3Fsequence%3D1&ei=tBUBU5uzNdOQhQetj4HIDA&usg=AFQjCNHn3loibKepIfzMNlbW5y_FjYdvNQ&bvm=bv.61535280,d.ZG4&cad=rja)
11. W. NOVOTNÝ, Lubomír. *Technický týdeník. Konstrukce CNC obráběcích strojů (5)* [online]. 2013 [cit. 2014-02-16]. DOI: ISSN 0040-1064. Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/konstrukce-obrabecich-stroju/konstrukce-cnc-obrabecich-stroju-5\\_20584.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/konstrukce-obrabecich-stroju/konstrukce-cnc-obrabecich-stroju-5_20584.html)



12. WHP TECHNIK: *Měřicí technika*. [online]. [cit. 2014-02-16]. Dostupné z: <http://www.whp.cz/merici-technika.html>
13. SVOBODA, Ondřej. *MM Průmyslové spektrum*. Kontrola geometrické přesnosti pětiosých strojů [online]. 2011, roč. 2011, č. 03 [cit. 2014-03-04]. DOI: 1212-2572. Dostupné z: <http://www.misan.cz/pdf/-clanek-v-casopise-mm-prumyslove-spektrum-201103/>
14. BACH, Pavel. *Geometrická přesnost – Schlesingerova metoda* [online]. České vysoké učení technické v Praze, fakulta strojní, 2009 [cit. 2014-02-27]. Dostupné z: [http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor\\_stud/SD\\_-\\_2351086/P\\_Nove\\_metody\\_mereni\\_presnosti\\_obrabecich\\_stroju.pdf](http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor_stud/SD_-_2351086/P_Nove_metody_mereni_presnosti_obrabecich_stroju.pdf)
15. SMOLEK, Jan. *Střední průmyslová škola a vyšší odborná škola technická Brno. Kontrola a měření strojních zařízení: Kontrola obráběcích strojů-Zásady a pomůcky*. Brno, 2013. Dostupné z: [http://web.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,%20KOM/VY\\_32\\_INOVACE\\_24-08.pdf](http://web.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,%20KOM/VY_32_INOVACE_24-08.pdf)
16. PATA, Vladimír. *Počítačová podpora metrologie: Úvod do laserové interferometrie*. [online]. [cit. 2014-02-16]. Dostupné z: <http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/6SR/5.Uvod%20do%20laserove%20interferometrie.ppt>
17. KNOBLOCH, Josef. *Mapování geometrických chyb v pracovním prostoru obráběcího stroje* [online]. Brno, 2011 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=40567](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40567). Diplomová práce.
18. VOJTA, Jaroslav. *Kalibrace a návrh repase universálního měřicího mikroskopu*. Brno, 2008. Dostupné také z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=6188](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6188). Diplomová práce.
19. Automatic measurement in industrial production: *Strong bet Leica by automating processes using Laser Trackers*, [online]. 2008 [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: <http://www.interempresas.net/Measure/Articles/21950-Strong-bet-Leica-by-automating-processes-using-Laser-Trackers.html>
20. Faro Technologies. *Robot Calibration* [online]. 2014 [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: <http://www.faro.com/measurement-solutions/applications/robot-calibration>
21. Lasertracker und Zubehör. *Automated Precision Europe GmbH. Api\_Radian Brochure En0812\_Web* [online]. 2011 [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: <http://www.apisensor.com/index.php/products-de>
22. Maxhame, Dave. *The Practical Approach to Volumetric Error Compensation. Quality Digest* [Online], 2010-02-22. [cit. 2011-05-03.]. Dostupné z: <http://www.qualitydigest.com/inside/cmssc-article/practical-approach-volumetric-error-compensation.html>
23. Optical Gaging Products. *Etalon LaserTRACER Precisely Calibrates Machine Tools and Metrology Systems* [online]. [cit. 2014-02-26]. Dostupné z: [http://mfgnewsweb.com/archives/general\\_editorials/jan10/etalon\\_lasertracer.htm](http://mfgnewsweb.com/archives/general_editorials/jan10/etalon_lasertracer.htm)

24. Etalon Ag. *LaserTracer-MT* [online]. [cit. 2014-02-26]. Dostupné z: <http://etalon-ag.de/index.php/en/products/lasertracer-mt>
25. BACH, Pavel. *Nové metody měření přesnosti obráběcích strojů* [online]. České vysoké učení technické v Praze, fakulta strojní, 2009 [cit. 2014-02-27]. Dostupné z: [http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor\\_stud/SD\\_-\\_2351086/P\\_Nove\\_metody\\_mereni\\_presnosti\\_obrabecich\\_stroju.pdf](http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor_stud/SD_-_2351086/P_Nove_metody_mereni_presnosti_obrabecich_stroju.pdf)
26. Ibs Precision Engineering Bv. *IBS Precision Engineering* [online]. [cit. 2014-03-04]. Dostupné z: <http://www.ibspe.com/page/welcome-to-ibs-precision-engineering.htm>
27. RENISHAW S.R.O. *Kontrolní systém AxiSet Check-Up* [online]. 2009 [cit. 2014-03-04]. Dostupné z: <http://resources.renishaw.com/download.aspx?lang=cs&data=24737>
28. RENISHAW S.R.O. *Bezdrátový diagnostický systém ballbar QC20-W: popis a specifikace* [online]. 2010 [cit. 2014-03-04]. Dostupné z: <http://resources.renishaw.com/download.aspx?lang=cs&data=26355>
29. ČSN ISO 10791-7. *Podmínky zkoušek pro obráběcí centra: Část 7: Přesnost dokončovaného zkušebního obrobku*. Praha: Svaz výrobců a dodavatelů strojírenské techniky Praha, 2005.
30. ČSN ISO 230-1. *Zásady zkoušek obráběcích strojů: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo kvazistatických podmínek. Svaz strojírenské technologie*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologie a státní zkušebnictví, 2014.
31. TRANSTECH TOOLING, s. r. o. *SikaBlock: Modelový blokový materiál*. Popůvky u Brna, 2010. Dostupné z: <http://www.tooling.cz/index.php?typ=TGA&showid=31>
32. TOPOMATIKA. *Optička mjerna tehnika u dinamičkoj analizi strojeva za obradu metala deformiranjem*. [online]. 2008 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: [http://www.topomatika.hr/primjeri/pontos\\_primjer\\_02.html](http://www.topomatika.hr/primjeri/pontos_primjer_02.html)
33. GOM MBH. *Pontos: Dynamic 3D Analysis*. 2012. Dostupné z: [www.gom.com](http://www.gom.com)
34. MICHALISKO, J. *Využití 3D skenování pro přípravu obrábění odlitků součástí parních turbín* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 58 s. Dostupné také z: [https://www.vutbr.cz/studium/zaverene-prace?action=detail&zp\\_id=51165&fid=&rok=&typ=&jazyk=&text=MICHALISKO&hl\\_klic\\_slova=0&hl\\_abstrakt=0&hl\\_nazev=0&hl\\_autor=1&str=1](https://www.vutbr.cz/studium/zaverene-prace?action=detail&zp_id=51165&fid=&rok=&typ=&jazyk=&text=MICHALISKO&hl_klic_slova=0&hl_abstrakt=0&hl_nazev=0&hl_autor=1&str=1)
35. ČSN EN ISO 9283. *Manipulační průmyslové roboty - Technické parametry a související zkušební metody*. Praha: Svaz výrobců a dodavatelů strojírenské techniky Praha, 1999.
36. KUKA ROBO TER GMBH. *KR 60 HA (high accuracy)* [online]. 05.04.2013 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: [http://www.kuka-robotics.com/cs/products/industrial\\_robots/special/high\\_accuracy\\_robots/kr60\\_ha/](http://www.kuka-robotics.com/cs/products/industrial_robots/special/high_accuracy_robots/kr60_ha/)
37. KUKA ROBO TER GMBH. *Robots KR QUANTEC extra HA* [online]. 05.04.2013 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: [http://www.kuka-robotics.com/en/products/industrial\\_robots/special/high\\_accuracy\\_robots/kr120\\_r2700\\_extra\\_ha/](http://www.kuka-robotics.com/en/products/industrial_robots/special/high_accuracy_robots/kr120_r2700_extra_ha/)

38. RENISHAW S.R.O. *Laserový systém XL-80: Přenosný laserový měřicí a kalibrační systém*. Anglie, [online]. 2007 [cit. 2014-02-21]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/media/pdf/cs/d45dd6569592477a8c634cf5b4deb032.pdf>
39. RENISHAW PLC. Teorie a praxe testování [online]. [cit. 2014-03-04]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/teorie-a-praxe-testovani--6818?>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

Zkratka	Jednotka	Popis
ADM	[-]	automatizovaný laserový měřič vzdálenosti
ANSI	[-]	Americký národní standardizační ústav
CAD	[-]	počítačem podpořený návrh
CAM	[-]	počítačem podporovaná výroba
CNC	[-]	číslicové řízení pomocí počítače
ČSN	[-]	Česká technická norma
EMT	[-]	electronic measuring tool
EN	[-]	Evropská norma
GPS	[-]	globální triangulační systém
HA	[-]	vyšší přesnost
ISO	[-]	mezinárodní organizace pro standardizaci
IFM	[-]	laserový snímač měřící vzdálenosti
JIS	[-]	Japonská norma
LED	[-]	světloemitující dioda
NC	[-]	číslicové řízení
PUR	[-]	Polyuretan
RAM	[-]	vyrovnávací paměť počítače
SK	[-]	Slinutý karbid
VDI	[-]	Verein Deutscher Ingenieure
3D	[-]	třírozměrné zobrazení

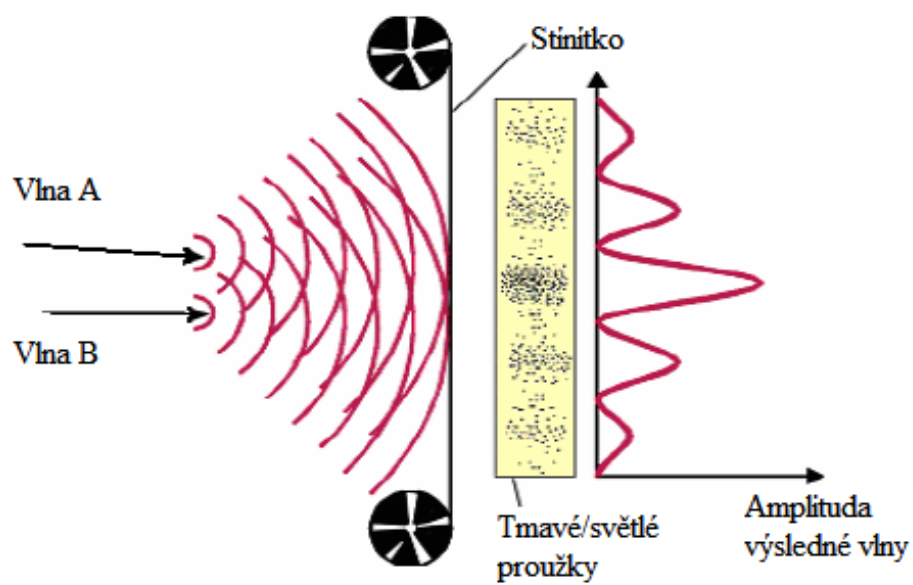
Symbol	Jednotka	Popis
D	[mm]	průměr nástroje
E	[Mpa]	modul pružnosti
L	[m]	délka
N	[Kč]	náklady
P <sub>x</sub>	[dpi]	rozlišení
R <sub>a</sub>	[μm]	drsnost povrchu
S	[m <sup>2</sup> ]	plocha
T	[°C]	teplota
V	[m <sup>3</sup> ]	objem
a <sub>p</sub>	[mm]	přisuv
f	[Hz]	frekvence
f <sub>z</sub>	[mm]	posuv na zub
m	[kg]	hmotnost
n	[1/min]	otáčky nástroje
t	[min]	čas
$S_{u_R}^2$	[mm <sup>2</sup> ]	rozptyl
$S_{u_R}$	[mm]	směrodatná odchylka
v <sub>c</sub>	[m/min]	řezná rychlost
v <sub>f</sub>	[m/min]	posuvová rychlost
$\overline{u_R}$	[mm]	střední hodnota odchylek
$u_{R\max}$	[mm]	maximální odchylka
$u_{R\min}$	[mm]	minimální odchylka
$\tilde{u}_R$	[mm]	medián
α <sub>T</sub>	[K <sup>-1</sup> ]	Koeficient lineární tepelné roztažnosti
γ	[K <sup>-1</sup> ]	teplotní roztažnost
ρ	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota
σ	[Mpa]	pevnost v tlaku
σ <sub>d</sub>	[Mpa]	pevnost v ohybu

**SEZNAM PŘÍLOH**

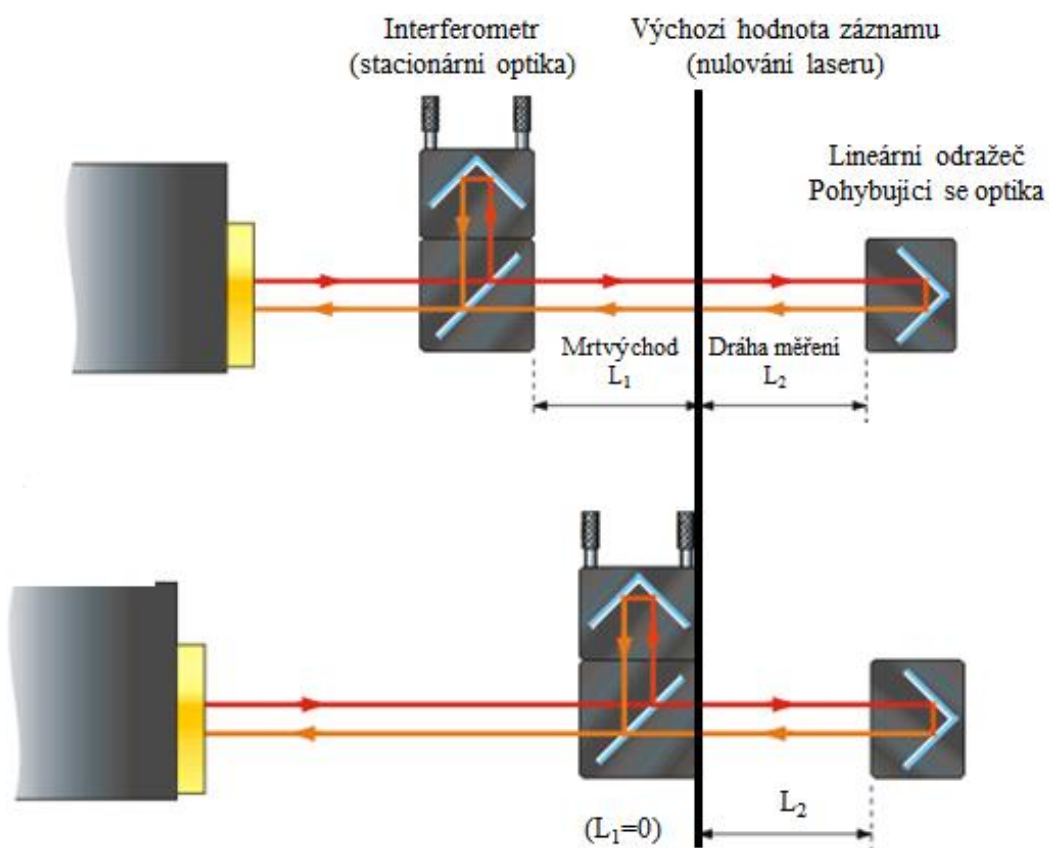
Příloha 1	Ukázky chyb a zobrazení interferometru.
Příloha 2	Praktické využití interferometru.
Příloha 3	Samocentrovatelná hlava a kalibrační artefakt.
Příloha 4	Dynamická fotogrammetrie systémem Pontos.
Příloha 5	Grafy pro nastavení měřicí vzdálenosti kamer.
Příloha 6	Výkres zkušebního obrobku.
Příloha 7	Reporty z měření přesnosti pomocí zkušebního obrobku.
Příloha 8	Reporty naměřených odchylek pro robota KR 120 R2700 extra HA Pontos.
Příloha 9	Reporty naměřených odchylek pro robota KR60HA systémem Pontos.



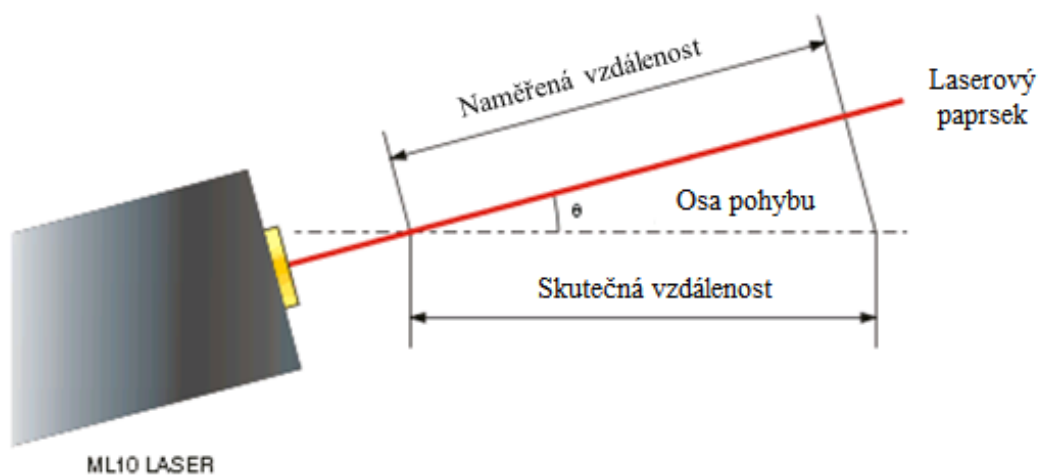
## PŘÍLOHA 1



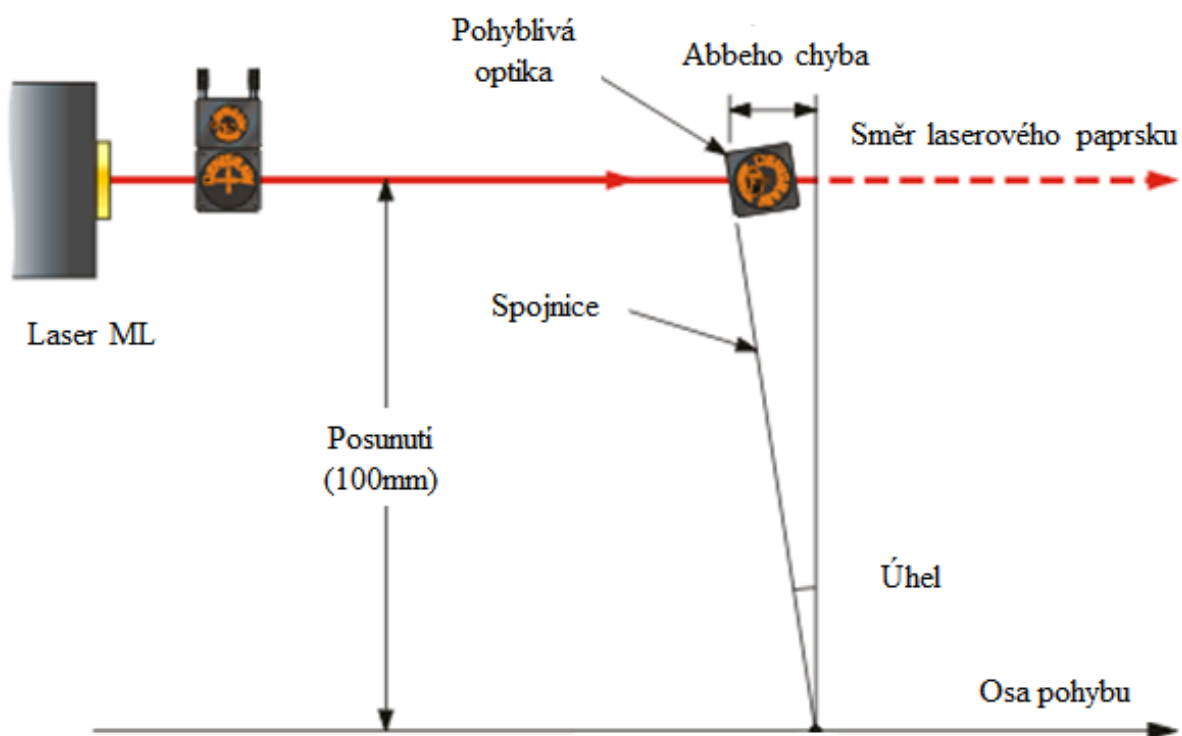
Interferující vlny na stínítku<sup>18</sup>.



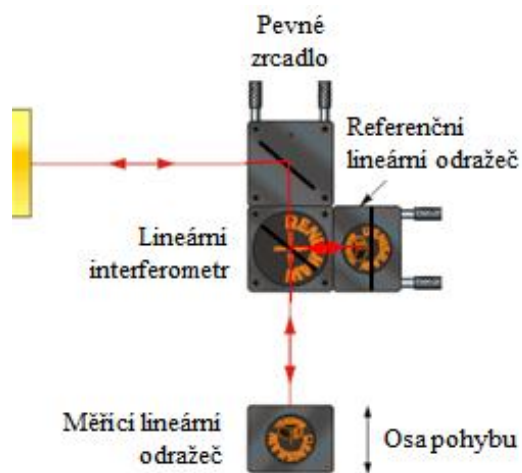
Chyba mrtvé dráhy<sup>16</sup>.



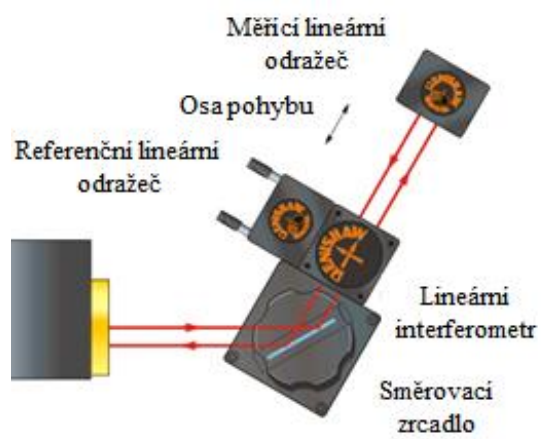
Cosinova chyba<sup>16</sup>.



Abbeho chyba<sup>16</sup>.



Natočení laserové hlavy v pravém úhlu<sup>16</sup>.



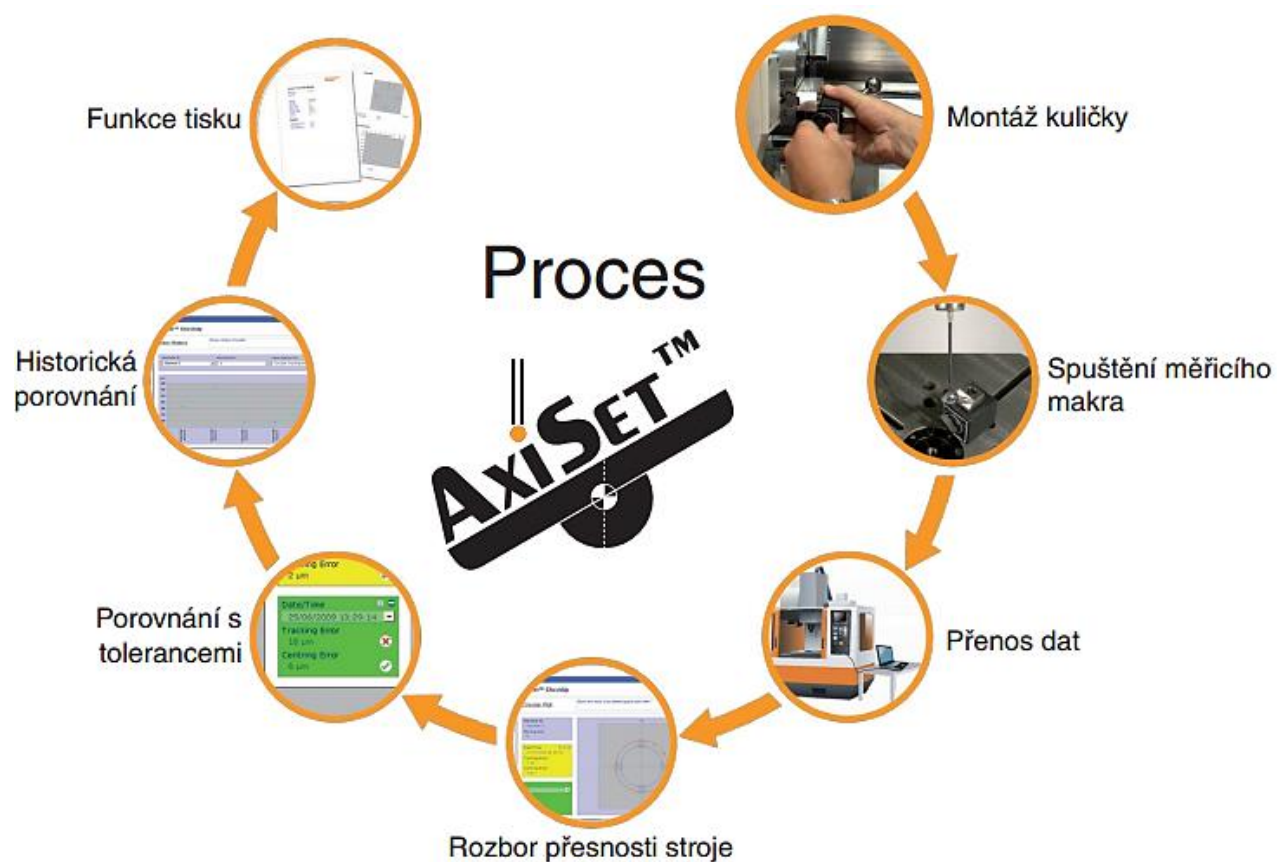
Natočení laserové hlavy v obecném úhlu<sup>16</sup>.

## PŘÍLOHA 2

Popis a názorné využití interferometru<sup>38</sup>

Popis využití	Názorné měření	Zařízení
přesnost polohování lineárních os		
přímost vedení a příčné vůle		
přesnost polohování rotačních os		
rovinnost		
přímočarost pojezdů		
kolmost		

## PŘÍLOHA 3



Samocentrovatelná hlava a kalibrační artefakt<sup>27</sup>.

a)

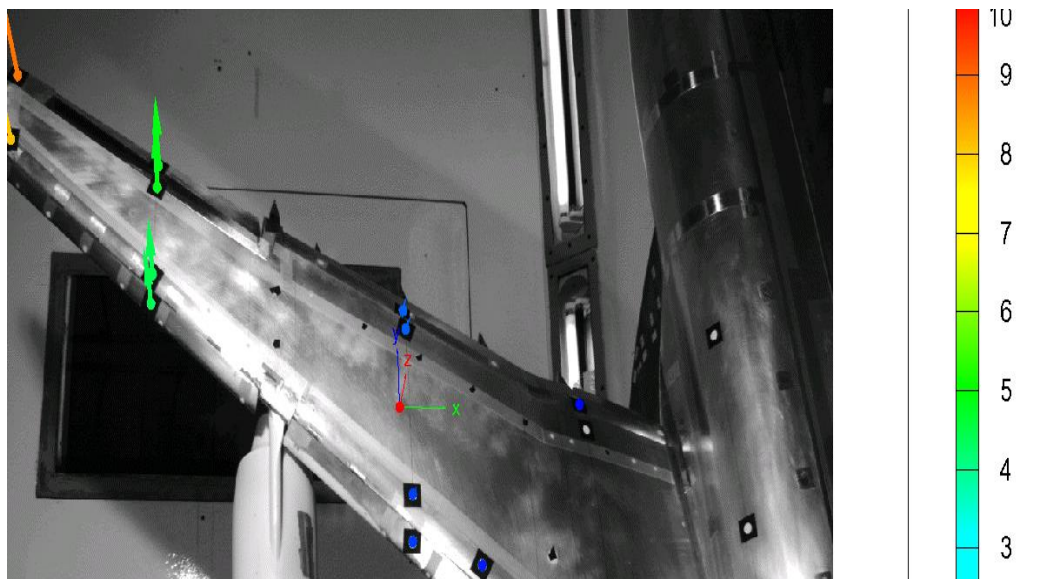


b)



Způsob měření Systémem Ballbar QC20-W<sup>39</sup>, a) uzavřenou trajektorie 360°, b) částečném oblouku 220°.

## PŘÍLOHA 4



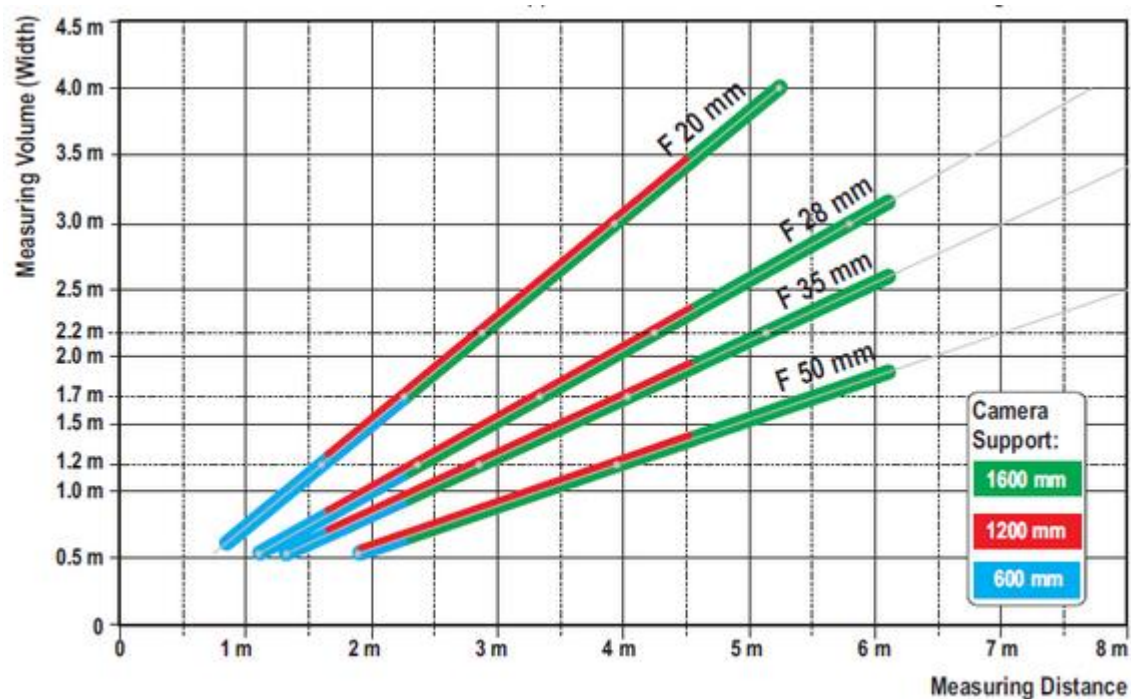
Dynamická fotogrammetrie deformace křídla<sup>32</sup>.



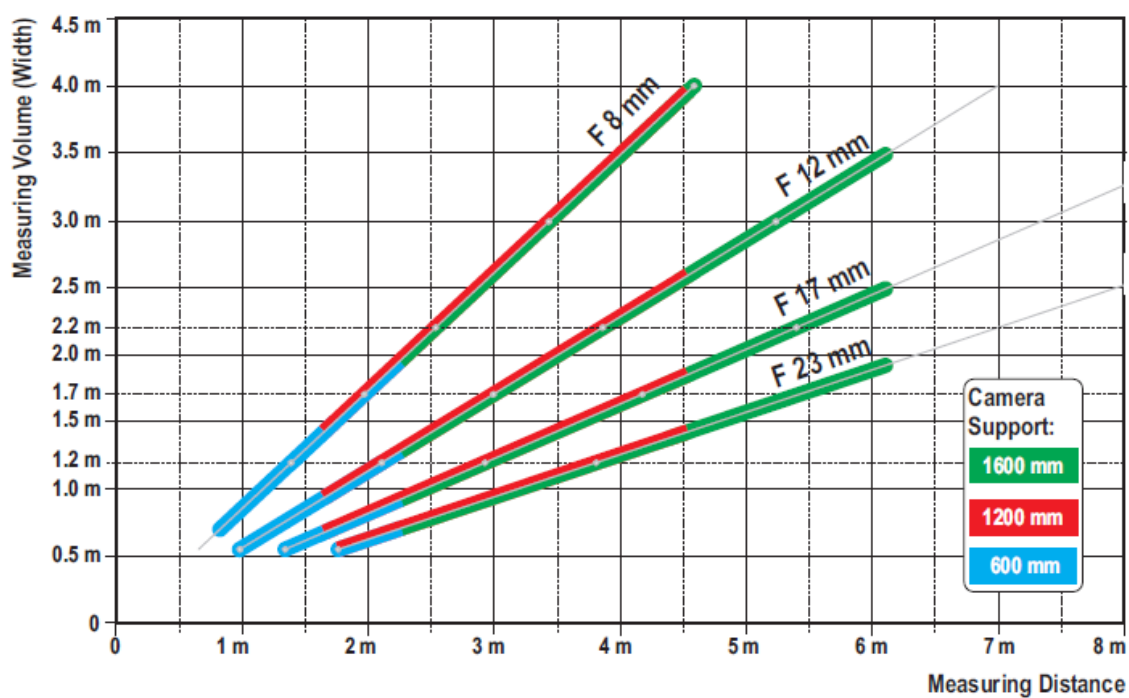
Dynamická fotogrammetrie vybrace při spuštění motoru<sup>32</sup>.



## PŘÍLOHA 5



Měřicí vzdálenost pro kamery Pontos HS<sup>33</sup>.



Měřicí vzdálenost pro kamery Pontos 2M<sup>33</sup>.